Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Юргинский технологический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Дронов Антон Анатольевич

# ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ СЕКЦИЙ ГЕОХОДА

Специальность 05.05.06 - «Горные машины»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук

Аксенов Владимир Валерьевич

# оглавление

С	ЭГЛА	АВЛЕНИЕ	2
B	ВЕД	ĮЕНИЕ	5
1	C	ОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	. 11
	1.1	Геоходная технология проведения горных выработок,	
	ВИН	топоворотные проходческие агрегаты	. 11
	1.2	Обзор опорно-поворотных устройств и подшипниковых узлов	
	рото	орных исполнительных органов проходческих щитов	. 14
	1.3	Обзор трансмиссий геоходов	. 18
	1.4	Математическая модель взаимодействия геохода с геосредой	. 23
	1.5	Метод конечных элементов и программные комплексы для его	
	реал	лизации	. 25
	1.6	Обзор метода анализа иерархий	. 27
	1.7	Выводы	. 29
2	P	АЗРАБОТКА СХЕМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ УЗЛА	
C	СОПЕ	РЯЖЕНИЯ СЕКЦИЙ ГЕОХОДА	. 31
	2.1	Разработка структурной схемы схемы узла сопряжения секций геохода.	. 31
	2.2	Особенности работы геохода и формирование требований к узлу	
	соп	ряжения секций геохода	. 33
	2.3	Разработка и анализ компоновочных схем узла сопряжения секций	
геохода			
	2.4	Разработка и анализ конструктивных решений узла сопряжения секций	
	геоу	хода	. 48
	2.5	Выводы	. 57
3	А	ДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	
Γ	EOX	ХОДА С ГЕОСРЕДОЙ	. 59
	3.1	Определение влияния компоновочной схемы узла сопряжения секций	
	на м	массогабаритные параметры вращающейся и не вращающейся частей	
	кор	пуса геохода	. 59

3.2	Определение усилий, действующих на геоход во время его				
пер	емещения	2			
3.3	Формирование исходных данных71	1			
3.4	Влияние положения границы вращающейся и не вращающейся частей				
кој	пуса геохода на значения усилий, действующих на геоход во время его				
пер	емещения76	5			
3.5	Влияние выбора компоновочной схемы узла сопряжения секций геохода				
на	на значения усилий, действующих на геоход во время его перемещения				
3.6	Выводы	2			
4 I	ССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО				
COC	ГОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ СЕКЦИЙ ГЕОХОДА 84	1			
4.1	Влияние компоновочной схемы узла сопряжения секций геохода на				
на	ряженно-деформированное состояние его элементов	1			
4	.1.1 Разработка электронной геометрической модели узла сопряжения				
С	екций геохода	1			
4	.1.2 Разработка расчетной модели для проведения анализа напряженно-				
Į	еформированного состояния элементов узла сопряжения секций геохода				
E	зависимости от выбранного компоновочного решения	)			
4	.1.3 Обоснование размера конечных элементов при дискретизации				
Э	пектронной модели узла сопряжения секций геохода	5			
4	.1.4 Оценка влияния компоновочной схемы узла сопряжения секций				
Γ	еохода на напряженно-деформированное состояние его элементов	7			
4	.1.5 Выбор компоновочной схемы узла сопряжения секций геохода				
N	етодом анализа иерархий112	2			
4.2	4.2 Влияние геометрических параметров элементов для передачи тягового				
уси	усилия на напряженно-деформированное состояние оболочки и внутреннего				
кој	ьца узла сопряжения секций геохода121	l			

4.2.1 Адаптация электронной геометрической модели узла сопряжения				
секций геохода для определения влияния геометрических параметров				
элементов для передачи тягового усилия на напряженно-деформированное				
состояние его оболочки и внутреннего кольца 121				
4.2.2 Разработка расчетной модели для проведения анализа напряженно-				
деформированного состояния оболочки и внутреннего кольца узла				
сопряжения секций геохода при изменении геометрических параметров				
элементов для передачи тягового усилия 123				
4.2.3 Оценка влияния геометрических параметров элементов для передачи				
тягового усилия на напряженно-деформированное состояние оболочки и				
внутреннего кольца узла сопряжения секций геохода				
4.3 Выводы				
5 РАЗРАБОТКА УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ СЕКЦИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА				
ГЕОХОДА				
5.1 Методика определения параметров узла сопряжения секций геохода 142				
5.2 Формирование исходных данных для определения параметров узла				
сопряжения секций опытного образца геохода146				
5.3 Разработка узла сопряжения секций опытного образца геохода 150				
5.4 Выводы				
ЗАКЛЮЧЕНИЕ				
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ				
ПРИЛОЖЕНИЕ А				

#### введение

#### Актуальность работы.

Строительство подземных сооружений различного назначения является приоритетным направлением развития инфраструктуры в большинстве развитых стран. Количество таких объектов удваивается каждые 10 лет, при этом темпы освоения подземного пространства постоянно наращиваются. Актуальной задачей является развитие новых технологий и техники для проведения горных выработок.

Геоходная (геовинчестерная) технология, как альтернатива традиционным способам проведения горных выработок, была предложена сотрудниками лаборатории проходческих комплексов ИУ СО АН СССР (ныне ФИЦ УУХ СО РАН) в 1980-х годах. Геоходная технология проведения горных выработок основана на формировании и использовании системы законтурных каналов для перемещения проходческого оборудования на забой. Реализовать данный способ проведения горных выработок позволяет проходческий агрегат нового класса – геоход.

В 2000-х годах работы по созданию геохода нового поколения были продолжены коллективом ученых НИ ТПУ, ФИЦ УУХ СО РАН и КузГТУ. Полученные результаты позволили коллективу принять участие в открытом конкурсе Министерства образования и науки по Постановлению Правительства РФ №218. По результатам конкурса был заключен договор №02.G25.31.0076 «Создание и постановка на производство нового вида щитовых проходческих агрегатов многоцелевого назначения - геоходов».

В рамках работ по договору была поставлена задача по созданию опытного образца геохода, реализующего совмещенный принцип перемещения на забой. Была предложена двухсекционная конструкция геохода, что, в свою очередь, требовало разработки узла сопряжения секций (УСС). УСС геохода предназначен для передачи вращающего момента трансмиссии от стабилизирующей (хвосто-

вой) секции геохода на головную секцию, при одновременной передаче тягового усилия от головной секции к стабилизирующей.

Отсутствие научно-технических и научно-методических наработок по УСС стало сдерживающим фактором при разработке опытного образца геохода, что, в свою очередь, обуславливает актуальность данного исследования.

## Степень разработанности.

Первопроходцами по созданию винтоповоротных проходческих агрегатов являлись Эллер А.Ф., Аксенов В.В., Нагорный В.Д., Горбунов В.Ф. Работами по созданию геоходов и их систем занимались Аксенов В.В., Садовец В.Ю., Блащук М.Ю., Бегляков В.Ю., Тимофеев В.Ю., Чернухин Р.В., Ефременков А.Б., Ананьев К.А., Ермаков А.Н. и др. Однако ни одна работа указанных авторов не посвящена определению параметров УСС геохода.

Цель работы – обоснование параметров и разработка узла сопряжения секций геохода.

**Идея работы** заключается в оценке, сравнении и анализе влияния компоновочных схем узла сопряжения секций на силовые параметры геохода и прочностные характеристики отдельных его элементов.

### Задачи работы:

 – разработать требования, компоновочные схемы и конструктивные решения УСС геохода;

 – адаптировать модель взаимодействия геохода с геосредой и определить влияние параметров УСС геохода на значения усилий, действующих на геоход во время его перемещения;

– разработать модель взаимодействия элементов УСС геохода между собой;

 определить влияние компоновочных схем УСС и геометрических параметров элементов УСС на их напряженно-деформированное состояние;

обосновать параметры УСС опытного образца геохода диаметром
 3,2 метра.

#### Научная новизна:

предложены компоновочные схемы и конструктивные решения УСС геохода, проведен их анализ;

 доказана необходимость создания модульной конструкции узла сопряжения секций, с едиными присоединительными размерами и базовыми поверхностями;

 получены аналитические выражения для определения требуемого вращающего момента трансмиссии, силы взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса и силы реакции геосреды на внешний движитель геохода;

определено влияние компоновочных схем и геометрических параметров
 элементов УСС на их напряженно-деформированное состояние.

## Теоретическая значимость работы.

Полученные аналитические выражения и модели позволяют проводить исследования взаимодействия геохода с геосредой, а также взаимодействия элементов УСС между собой.

#### Практическая значимость работы.

Компоновочные схемы и конструктивные решения УСС геохода, а также методика расчета его параметров могут быть использованы в проектноконструкторских организациях, занимающихся созданием горнопроходческой техники, а также при обучении студентов по направлениям подготовки, связанным с проектированием горных машин.

### Методология и методы выполнения исследований.

Для решения поставленных задач в работе использовался комплекс методов, включающий:

 – численное и математическое моделирование взаимодействия геохода с геосредой и взаимодействия элементов УСС между собой;

– метод конечных элементов (МКЭ);

применение ограничений и допущений при формировании условий задач;

 – анализ зависимостей напряженно-деформированного состояния элементов УСС от компоновочных схем УСС и геометрических параметров его элементов;

– метод анализа иерархий.

#### На защиту выносятся следующие результаты и положения:

 адаптированная математическая модель взаимодействия геохода с геосредой, позволяющая определять силовые параметры узла сопряжения секций геохода с учетом различных вариантов его компоновочных схем;

 модель взаимодействия элементов узла сопряжения секций геохода между собой, предусматривающая исполнение УСС по различным вариантам компоновочных схем;

– при увеличении длины вращающейся части корпуса при неизменной общей длине геохода, требуемый вращающий момент трансмиссии монотонно увеличивается, а сила взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса и сила реакции геосреды на внешний движитель геохода монотонно уменьшаются;

– при количестве сухарей от 4-х до 20-ти штук требование равнопрочности корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС геохода не зависит от их количества и выполняется при суммарной площади контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС равной 39 - 42% от площади целого кольца. При этом увеличение количества сухарей в том же диапазоне ведет к снижению значений максимальных напряжений, при которых соблюдается требование равнопрочности корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС геохода. Влияние количества сухарей на данные напряжения с увеличением количества сухарей снижается.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в научно-квалификационной работе, обеспечиваются корректностью допущений при разработке методики расчета основных параметров УСС геоходов, гарантируются использованием фундаментальных положений механики, прикладной математики, динамики машин, расчета деталей машин.

#### Личный вклад автора заключается:

 в обосновании и синтезе новых компоновочных схем и конструктивных решений УСС геохода;

 в адаптации модели взаимодействия геохода с геосредой и определении влияния параметров УСС геохода на значения усилий, действующих на геоход во время его перемещения;

 в разработке модели взаимодействия элементов УСС между собой с учётом вариативности компоновочных схем УСС;

- в разработке методики расчета основных параметров УСС;

 в получении зависимостей различных параметров геохода от конструктивного исполнения УСС;

в обосновании параметров УСС опытного образца геохода диаметром
 3,2 метра.

## Реализация выводов и рекомендаций работы.

Результаты работы были использованы при выполнении НИОКТР по созданию опытного образца геохода в рамках открытого конкурса Министерства образования и науки по Постановлению Правительства РФ №218 (договор №02.G25.31.0076 «Создание и постановка на производство нового вида щитовых проходческих агрегатов многоцелевого назначения - геоходов». Также работа над данной тематикой поддержана грантом Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «УМНИК-2015».

### Апробация работы.

Основные положения научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались на Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, 2015), «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2013) а также на Всероссийских и Международных научно-практических конференциях «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (Кемерово, 2013, 2014), «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» (Юрга, 2013–2018).

# Публикации.

По теме диссертации всего опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК России.

# Структура и объем работы.

Работа изложена на 169 страницах текста. Она состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы из 75 наименований и одного приложения. Диссертационная работа содержит 65 рисунков и 32 таблицы.

Автор выражает благодарность коллективу, выполнявшему работы в рамках договора №02.G25.31.0076 «Создание и постановка на производство нового вида щитовых проходческих агрегатов многоцелевого назначения - геоходов», а также лично к.т.н. Беглякову Вячеславу Юрьевичу и к.т.н. Блащуку Михаилу Юрьевичу за помощь и поддержку, оказанную при работе над диссертацией.

## 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

# 1.1 Геоходная технология проведения горных выработок, винтоповоротные проходческие агрегаты

Геоход – механизированный проходческий аппарат, реализующий новый принцип проходки горных выработок [1–5]. Во время перемещения геоход создает систему законтурных каналов, которую использует для получения тягового усилия на внешнем движителе. Таким образом, в формировании тягового усилия, в отличии от известной проходческой техники, участвуют силы реакции геосреды на внешнем движителе геохода, а не силы трения на границе раздела сред [4,6–10].

Реализация указанного принципа работы проходческой техники получила название – геоходная технология проведения горных выработок. Геоходная технология проведения горных выработок имеет ряд преимуществ перед традиционными способами проходки [1–3,11,12]:

возможность создания достаточных напорных усилий на исполнитель ном органе машины при меньшей металлоемкости оборудования;

 отсутствие ограничений использования проходческого оборудования по углам строительства подземных выработок.

История геоходов берет свое начало с разработки экспериментального винтоповоротного проходческого агрегата (ВПА) ЭЛАНГ-3 (авторы: Эллер А.Ф., Аксенов В.В., Нагорный В.Д., Горбунов В.Ф.).

ВПА ЭЛАНГ-3 (Рисунок 1.1) прошел испытания на шахте «Карагайлинская» ПО «Киселевскуголь», где была доказана работоспособность геоходной технологии проведения горных выработок [11,13]. ВПА ЭЛАНГ-3 состоит из трех цилиндрических секций, которые соединены между собой гидродомкратами, расположенными по хорде к окружности секций. Все три секции оборудованы внешним движителем, который представляет собой винтовую лопасть. Также секции оборудованы анкерными лыжами для восприятия реактивного вращающего момента при перемещении агрегата. При проходке горной выработки осуществляется поочередное ввинчивание секций на величину хода внешнего движителя на забой. Таким образом, перемещение на забой происходит в цикличном режиме.



а) общий вид; б) принципиальная схемаРисунок 1.1 – ВПА ЭЛАНГ-3

Последующей разработкой, осуществляющей проходку горных выработок по геоходной технологии, стал ВПА ЭЛАНГ-4 (Рисунок 1.2). ВПА ЭЛАНГ-4 имеет двухсекционную конструкцию. Внешний движитель расположен только на головной секции, стабилизирующая секция оснащена элементами противовращения для восприятия реактивных моментов при перемещении агрегата. Секции соединены гидроцилиндрами, расположенными по хорде к окружности секций для передачи вращающего момента, а также гидроцилиндрами надвига. Гидроцилиндры надвига позволяют подтягивать стабилизирующую секцию к головной после продвижения головной секции на забой на некоторую величину. Таким образом, ВПА ЭЛАНГ-4 также реализует цикличный режим перемещения на забой [11,13].

Подробное описание принципа работы и характеристик винтоповоротных проходческих агрегатов приведены в работах [4,11,13–19].







а) общий вид; б) принципиальная схема

Рисунок 1.2 – ВПА ЭЛАНГ-4

Новым витком в области геоходостроения стала НИОКТР по созданию опытного образца геохода в рамках открытого конкурса Министерства образова-

Правительства РФ №218 Постановлению (договор ния И науки ПО № 02.G25.31.0076 «Создание и постановка на производство нового вида щитовых проходческих агрегатов многоцелевого назначения - геоходов»). Согласно техническому заданию на изготовление опытного образца геохода, он должен осуществлять совмещенный принцип работы, что стало возможным за счет введения в конструкцию геохода нового элемента – узла сопряжения секций (УСС) геохода. Отсутствие компоновочных схем, конструктивных решений и методик определения параметров УСС является сдерживающим фактором при разработке опытного образца геохода, что, в свою очередь, обуславливает актуальность данного исследования.

# 1.2 Обзор опорно-поворотных устройств и подшипниковых узлов роторных исполнительных органов проходческих щитов

Работа по созданию технически и научно обоснованных решений узла сопряжения секций геохода является актуальной задачей, решение которой целесообразно начать с анализа похожих конструкций применяемых в горной и строительной технике. В наибольшей степени функционально и конструктивно на УСС геохода похожи опорно-поворотные устройства (ОПУ) и подшипниковые узлы роторных исполнительных органов проходческих щитов [20,21].

ОПУ предназначено для передачи вращательного момента от основания к поворотной части машины при одновременной передаче вертикальных и горизонтальных нагрузок, а также опрокидывающего и крутящего моментов с поворотной части на основание [22,23]. ОПУ используется в кранах, экскаваторах, трелевочных тракторах, ветродвигателях, и других машинах и механизмах.

В основном, термин ОПУ применяется к подшипникам со специальной конструкцией, позволяющей передавать вращательное или колебательное (поворотное) движение между элементами машины.

ОПУ в виде подшипников со специальной конструкцией состоят из наружного и внутреннего колец (Рисунок 1.3). Одно из колец жестко сцеплено с неподвижной частью машины или агрегата (основанием), другое с подвижной ча-

14

стью. При этом на втором кольце располагается венец зацепления, для передачи крутящего момента от основания к подвижной части машины. В зависимости от конструктивных особенностей машины венец зацепления располагается по внешнему или внутреннему контуру кольца. В качестве тел качения используют шарики, ролики или их комбинации (при многорядном исполнении колец ОПУ). При малых скоростях вращения допускается использование тел скольжения. Кольца ОПУ большого диаметра могут быть исполнены в разрезном варианте. Мировыми лидерами по производству данного вида ОПУ являются компании RotheErde, Rollix, Kaydon, SKF.

К основным недостаткам ОПУ в виде подшипников со специальной конструкцией можно отнести:

- сложность изготовления;
- сложность установки;
- необходимость в постоянном техническом обслуживании;
- сложность монтажно-демонтажных работ.

Достоинства:

- высокая надежность,
- возможность работы при больших осевых усилиях.



Рисунок 1.3 – Опорно-поворотное устройство крана К-162

Подшипниковые узлы роторных исполнительных органов проходческих щитов также выполняются в виде подшипников со специальной конструкцией. В частности, подшипниковые узлы роторных исполнительных органов компании RotheErde (Рисунок 1.4) используются при проектировании проходческих щитов фирм Herrenknecht, Robbins, Mitsubishi и др. В данных узлах проходческих щитов применяют два и более ряда тел качения для компенсации больших осевых усилий. Особенностью подшипниковых узлов роторных исполнительных органов проходческих щитов является их использование в вертикальном положении.



a) на проходческом щите компании Herrenknecht; б) на проходческом щите компании Mitsubishi

Рисунок 1.4 – Подшипниковые узлы роторных исполнительных органов проходческих щитов производства фирмы RotheErde

На универсальных полноповоротных экскаваторах до последнего времени были распространены катковые ОПУ. На рисунке 1.5 показана конструкция многокаткового ОПУ. Рама поворотной обоймы опирается на опорные ролики. Ролики перемещаются по кольцевому рельсу с зубчатым венцом. Консольная шестерня поворотного механизма экскаватора находится в зацеплении с зубчатым венцом, благодаря чему происходит вращение рамы экскаватора относительно его ходовой части. Венец может быть выполнен с внутренним или внешним зацеплением [24].



1) рама поворотной обоймы, 2) кронштейн захватных роликов, 3) стопорный болт.

4) захватный ролик, 5) эксцентриковая ось, 6) зубчатый венец, 7) ось опорного ролика,

8) кольцо обоймы, 9) опорный ролик, 10) сектор-рельс

Рисунок 1.5 – Многокатковое опорно-поворотное устройство

Недостатки катковых ОПУ:

– неравномерность распределения нагрузок на катки;

появление зазоров между катками и рельсой в процессе эксплуатации,
 как следствие появление осевых отклонений между ходовой и поворотной
 частями машины.

Достоинства:

– простота изготовления;

– простота монтажно-демонтажных работ.

В башенных кранах нашли применение ОПУ с разнесенными по высоте опорами типа «колокол» и «стакан» [23]. Данные варианты ОПУ не могут быть применены к геоходу ввиду своих конструктивных особенностей.

В ходе обзора была составлена систематизация ОПУ, представленная на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Систематизация опорно-поворотных устройств

Все рассмотренные конструкции воспринимают усилия на сжатие (силы тяжести при горизонтальном расположении ОПУ, или реактивные усилия от исполнительного органа разрушения забоя при вертикальном расположении подшипникового узла роторных исполнительных органов проходческих щитов). УСС же воспринимает усилия на растяжение (за исключения случая вертикального движения вниз). Таким образом, в ходе обзора ОПУ и подшипниковых узлов роторных исполнительных органов проходческих щитов установлено, что их применение в качестве УСС опытного образца геохода невозможно ввиду функционально-конструктивных особенностей геохода.

# 1.3 Обзор трансмиссий геоходов

Трансмиссия геохода задает вращательное движение головной секции, в ходе которого происходит ввинчивание секции в геосреду с формированием тягового усилия на внешнем движителе. Существует ряд трансмиссий геохода, которые были предложены разными авторами [6,7,25–33].

Все предложенные варианты трансмиссий геохода можно разделить на несколько видов:

- на основе механической передачи (редукторов);
- на основе гидропривода;
- на основе волновой передачи.

На рисунке 1.7а) представлена схема трансмиссии геохода с зубчатой передачей внутреннего зацепления. Венец зубчатой передачи располагается на головной секции геохода, а редуктор с двигателем на хвостовой (стабилизирующей) секции. Согласно расчетам, приведенным в работе [25], передача требуемого вращающего момента трансмиссией геохода на основе редукторов, расположенных в один поток невозможна ввиду значительных расчетных габаритов зубчатого венца трансмиссии. Решением данной проблемы может стать реализация трансмиссии геохода с многопоточным редукторным приводом (Рисунок 1.7б). Однако в этом случае значительно увеличиваются габариты редукторов трансмиссии.

Таким образом, применение трансмиссии на основе механической передачи в геоходе осложнено необходимостью наличия свободного внутреннего пространства для транспортировки отбитой горной массы и сложно осуществимо на основе известных кинематических передач [25–28].



 а) с зубчатой передачей; б) с многопоточным редукторным приводом
 Рисунок 1.7 – Кинематические схемы трансмиссий геоходов с редукторным приводом [25]

Трансмиссии геохода на основе гидропривода можно условно разделить на два типа:

- с цикличной подачей на забой;

- с непрерывной подачей на забой.

На рисунке 1.8 представлены примеры кинематических схем трансмиссии геохода на основе гидропривода [6]. В обоих случаях цапфы корпусов гидроцилиндров трансмиссии закреплены на хвостовой (стабилизирующей) секции, а цапфы штоков упираются в пазы на храповом венце, закрепленном на головной секции геохода. При выдвижении штоков гидроцилиндров головная секция приводится во вращение. При складывании гидроцилиндров цапфы их штоков перескакивают в следующие пазы венца и цикл повторяется.

При схеме на рисунке 1.8а) раздвижение и складывание всех гидроцилиндров трансмиссии происходит одновременно, что обуславливает цикличность подачи геохода на забой. Для реализации непрерывной подачи геохода гидроцилиндры должны работать в разных фазах выдвижения. На рисунке 1.8б) представлена схема трансмиссии с 9-ю гидроцилиндрами, при этом 8 из них участвуют в формировании вращающего момента, а 9-й находится в фазе складывания. Также известна схема трансмиссии геохода с гидроцилиндрами, работающими в противофазе (одновременно половина гидроцилиндров раскладывается, а вторая половина складывается), что позволяет обеспечить требуемый вращающий момент трансмиссии с упрощенной, по сравнению с предыдущим вариантом, схемой управления гидроцилиндрами [6,29,30].

К достоинствам трансмиссии геохода на основе гидропривода можно отнести:

простота конструктивной реализации;

 обеспечение достаточного внутреннего пространства для транспортировки отбитой горной породы;

– непрерывность вращения головной секции (при схемах с гидроцилиндрами, работающими в разных фазах или противофазе).



б)

a) с цикличной подачей на забой со свободной перестановкой цапф штоков гидроцилиндров; б) с непрерывной подачей на забой с разными фазами выдвижения гидроцилиндров

Рисунок 1.8 – Кинематические схемы трансмиссий геоходов с гидроприводом [6]

Недостатки трансмиссии геохода с гидроприводом:

– сложность реализации управления (синхронизации работы гидроцилиндров);

– необходимость отслеживания положений гидроцилиндров для корректировки их работы.

21

В качестве альтернативного варианта можно рассматривать схему трансмиссии геохода на основе волновой передачи с промежуточными телами качения (ВППТК) (Рисунок 1.9) [7,31–33].



1 – стабилизирующая секция; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор с ВППТК; 4 – генератор волн; 5 – головная секция; 6 – внешний движитель

Рисунок 1.9 – Кинематическая схема трансмиссии геохода с ВППТК [33]

К преимуществам трансмиссии геохода с ВППТК относятся:

- обеспечение непрерывности вращения головной секции;
- простота организации реверса вращения;

 обеспечение достаточного внутреннего пространства для транспортировки отбитой горной породы.

Недостатки трансмиссии геохода с ВППТК:

- сложность изготовления;
- низкая ремонтопригодность;
- сложность монтажно-демонтажных работ;

 необходимость использования крупногабаритных и малораспространенных кольцевых электродвигателей.

Как показывает обзор, наиболее простым в исполнении представляется вариант трансмиссии геохода на основе гидропривода. Для обеспечения непрерывности вращения головной секции стоит рассматривать варианты трансмиссии с гидроцилиндрами работающими в разных фазах или противофазе. При этом схема трансмиссии с гидроцилиндрами, работающими в противофазе, проще в управлении (синхронизации работы гидроцилиндров).

#### 1.4 Математическая модель взаимодействия геохода с геосредой

Определению усилий, действующих на геоход во время его перемещения в горной среде, были посвящены работы Аксенова В.В., Ефременкова А.Б., Беглякова В.Ю., Блащука М.Ю., Тимофеева В.Ю., Ананьева К.А, Ермакова А.Н, Садовца В.Ю.[4–8,11,34–37].В части данных работ рассматривались конструкции винтоповоротных проходческих агрегатов, реализующих раздельный режим перемещения секций геохода [4,11]. Ряд работ был посвящен отдельным узлам и системам геохода [8,34–37]. В работах [5–7,11] представлена математическая модель работы геохода в совмещенном режиме.

Геосреда представляет собой массив горных пород, который имеет неоднородную по составу и свойствам структуру. Математическое описание такой среды обычными аналитическими методами затруднено вследствие ее неоднородности, дискретности и анизотропности. Неоднородность свойств осложняет определение влияния горного массива на перемещающееся в нем твердое тело. При этом на напряженно-деформированное состояние массива горных пород оказывает влияние система законтурных каналов, образованная при работе геохода [4,11,5,38].

Для изучения взаимодействий геохода с геосредой, целесообразно представить геосреду в виде идеализированной механической модели со свойствами приближенными к свойствам реального массива пород определенного типа [39,40].

Механические модели среды могут быть представлены в различных видах [40]: упругая, упругопластическая, жесткопластическая, вязкая и т.д. Работа геохода в совмещенном режиме носит динамический характер, что обуславливает выбор жесткопластической среды, при которой корпус геохода работает в режиме заданной нагрузки [4,11,41]. Известна математическая модель взаимодействия ВПА ЭЛАНГ-4 с геосредой, предложенная д.т.н. В.В. Аксеновым [4,11]. Данная математическая модель была использована в работах Блащука М.Ю., Тимофеева В.Ю., Ефременкова А.Б. [5–7].

В работе Ефременкова А.Б.[5] за основу принята конструктивная схема двухсекционного ВПА ЭЛАНГ-4, к которой приложены активные и реактивные силы и моменты (Рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Схема сил, действующих на ВПА ЭЛАНГ-4 [5]

Разрабатываемый опытный образец геохода обладает рядом конструктивных отличий от ВПА ЭЛАНГ-4:

– УСС должен обеспечивать непрерывный характер перемещения геохода;

используется исполнительный орган главного забоя барабанного типа [35];

 перед внешними движителями и элементами противовращения расположены исполнительные органы для формирования законтурных каналов[36].

Исследованию барабанного исполнительного органа геохода посвящены работы Ананьева К.А. [35,42–44]. Исследованию законтурных исполнительных органов (ЗИО) геохода посвящены работы Ермакова А.Н. [12,36,45–47].

Проведен анализ математической модели взаимодействия ВПА ЭЛАНГ-4 с геосредой. Анализ математической модели показывает необходимость ее адаптации в связи со значительными конструктивными отличиями разрабатываемого опытного образца геохода от ВПА ЭЛАНГ-4.

# 1.5 Метод конечных элементов и программные комплексы для его реализации

Метод конечных элементов (МКЭ) – один из основных методов решения задач механики деформируемого твердого тела, при котором происходит аппроксимация тела на конечные элементы, связанные между собой в узловых точках [48].

К достоинствам МКЭ можно отнести широкую инвариантность по отношению к геометрическим и механическим характеристикам исследуемого тела, простоту учета приложенных нагрузок и ограничений, а также высокую степень приспособленности под автоматизацию расчетов [49–53].В связи с этим, наибольшую популярность МКЭ получил с развитием компьютерных технологий.

В современном мире большая часть инженерных расчетов производится при помощи специализированных программных систем – САЕ (от англ. Computer-AidedEngineering). При объединении системСАЕ с системамидля автоматизации процесса проектированияСАD (от англ. Computer-AidedDesign),получают гибридные CAD/CAE-системы. Они позволяют создавать объемные модели твердых тел (Рисунок 1.11а), разбивать их на конечные элементы (Рисунок 1.11б), прикладывать ограничения и нагрузки к элементам, находящимся на границе твердотельной модели (Рисунок 1.11в) и получать эпюры напряжений (Рисунок 1.11г) и пе-

ремещений. Таким образом, CAD/CAE-системы позволяют проводить полный комплекс работ по исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) твердых тел.



а) создание объемной модели твердого тела; б) разбиение тела на конечные элементы;
 в) приложение нагрузок и ограничений;
 г)эпюра напряжений твердого тела

Рисунок 1.11 – Примеры этапов исследования НДС твердого тела

Наиболее популярными CAD/CAE-системами в России являются SolidWorks с интегрированной в нее системой SolidWorks Simulation, последние версии КОМПАС-3D и ANSYS.

Система SolidWorks Simulation, интегрированная с CAD-системой SolidWorks, может использоваться в качестве инструмента для исследования НДС элементов УСС геохода.

# 1.6 Обзор метода анализа иерархий

При разработке компоновочных схем и конструктивных решений новых машин их систем и узлов перед разработчиками возникает задача выбора предпочтительного решения. При этом количество критериев сравнения бывает достаточно обширным, что осложняет задачу выбора в случае, когда отсутствуют варианты решений полностью удовлетворяющие всем критериям.

Одним из наиболее распространенных многокритериальных методов принятия решений в настоящее время является метод анализа иерархий (МАИ) [54,55]. Главным преимуществом МАИ является возможность выстраивания рейтинга критериев, что позволяет количественно определить степень предпочтительности рассматриваемых решений [56].

При реализации МАИ выстраивается иерархическая структура выбора решения (Рисунок 1.12). Во главе структуры располагается цель, а ниже критерии сравнения решений (на основании требований, предъявляемых к системе). На нижнем уровне структуры располагаются варианты решения, среди которых ведется выбор предпочтительного решения [54–56].



Рисунок 1.12 – Иерархическая структура выбора решения МАИ

Далее создается матрица доминирования критериев (Таблица 1.1), которая строится путем парного сравнения критериев на основе фундаментальной шкалы оценок МАИ [54]:

1 – равная предпочтительность;

- 2 скорее равная предпочтительность;
- 3 средняя степень предпочтения;
- 4 скорее средняя степень предпочтения;
- 5 умеренно сильное предпочтение;
- 6 скорее умеренно сильное предпочтение;
- 7 очевидное предпочтение;
- 8 скорее очевидное предпочтение;
- 9 абсолютное предпочтение.

Таблица 1.1 – Матрица доминирования (парного сравнения) критериев

Критерии	Критерий 1	Критерий 2	Критерий 3	Вес приоритета
Критерий 1	1	$a_{12}$	$a_{13}$	$v_{I}$
Критерий 2	$a_{21} = 1/a_{12}$	1	$a_{23}$	$v_2$
Критерий 3	$a_{31} = 1/a_{13}$	$a_{32} = 1/a_{23}$	1	<i>V</i> <sub>3</sub>

Вес приоритета определяется по формуле [54]:

$$\nu_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i},\tag{1.1}$$

где  $w_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n \cdot a_{ij}}$  – вектор приоритетов.

Аналогично проводится парное сравнение вариантов решения для каждого критерия [54] (Таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Матрица парного сравнения вариантов решения по критерию

Критерий 1	Вариант решения 1	Вариант решения 2	Вариант решения 3	Вес приоритета
Вариант решения 1	1	<i>a</i> <sub>12</sub>	<i>a</i> <sub>13</sub>	$v_{11}$
Вариант решения 2	$a_{21} = 1/a_{12}$	1	<i>a</i> <sub>23</sub>	<i>v</i> <sub>12</sub>
Вариант решения 3	$a_{31} = 1/a_{13}$	$a_{32} = 1/a_{23}$	1	<i>v</i> <sub>13</sub>

Проверочным критерием адекватности проведенного анализа МАИ является согласованность матриц парных сравнений. Для определения согласованности матриц парных сравнений определяются показатели [54]:

– собственное число матрицы критериев  $\lambda_{max}$  (C3);

– индекс согласованности (ИС);

- отношение согласованности (OC).

Индекс согласованности матриц парных сравнений определяется по формуле [54]:

$$UC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1},\tag{1.2}$$

где *n* – порядок матрицы.

Отношение согласованности определяется путем сравнения ИС с табличными значениями случайного ИС для матриц разной размерности. ОС должно быть менее 0,2 [54].

Для всех вариантов решения вычисляются суммарные итоговые оценки, на основании которых выбирается предпочтительный вариант решения [54]:

$$\lambda_1 = \nu_1 \cdot \nu_{11} + \nu_2 \cdot \nu_{12} + \nu_3 \cdot \nu_{13}, \qquad (1.3)$$

где  $v_1, v_2, v_3$  – вес критериев 1, 2, 3;

 $v_{11}$ ,  $v_{12}$ ,  $v_{13}$  – вес варианта решения 1 по критериям 1, 2, 3.

#### 1.7 Выводы

1. Геоходы представляют собой новый класс горнопроходческой техники и являются базовым элементом геоходной технологии.

2. Отсутствие компоновочных схем, конструктивных решений и методик определения параметров УСС является сдерживающим фактором при разработке опытного образца геохода.

3. В наибольшей степени функционально и конструктивно на УСС геохода похожи опорно-поворотные устройства и подшипниковые узлы роторных исполнительных органов проходческих щитов, но их применение в качестве УСС опытного образца геохода невозможно ввиду функционально-конструктивных особенностей геохода.

4. Существующая математическая модель взаимодействия геохода с геосредой во время его перемещения требует адаптации в связи со значительными конструктивными отличиями разрабатываемого опытного образца геохода от ВПА ЭЛАНГ-4.

5. Для моделирования взаимодействия элементов УСС между собой и с другими системами геохода возможно применить метод конечных элементов.

6. Система SolidWorks Simulation, интегрированная с CAD-системой SolidWorks, может использоваться в качестве инструмента для исследования напряженно-деформированного состояния элементов УСС геохода.

7. При выборе предпочтительного варианта компоновочной схемы УСС может быть использован метод анализа иерархий, который позволяет количественно определить степень предпочтения рассматриваемых вариантов схем.

Целью данной работы является обоснование параметров и разработка узла сопряжения секций геохода. В рамках поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

 – разработать требования, компоновочные схемы и конструктивные решения УСС геохода;

 – адаптировать модель взаимодействия геохода с геосредой и определить влияние параметров УСС геохода на значения усилий, действующих на геоход во время его перемещения;

– разработать модель взаимодействия элементов УСС геохода между собой;

 определить влияние компоновочных схем УСС и геометрических параметров элементов УСС на их напряженно-деформированное состояние;

обосновать параметры УСС опытного образца геохода диаметром
 3,2 метра.

# 2 РАЗРАБОТКА СХЕМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ СЕКЦИЙ ГЕОХОДА

# 2.1 Разработка структурной схемы схемы узла сопряжения секций геохода

Рассмотрим принцип работы геохода. Допустим, что геоход уже осуществил старт, и находится внутри проводимой горной выработки. Трансмиссия геохода передает вращательное движение от стабилизирующей секции к головной. Стабилизирующая секция оснащена элементами противовращения (ЭП), которые не позволяют провернуться секции в выработке. Головная секция оснащена внешними движителями (ВД) в виде лопастей, расположенных на внешней оболочке. За счет взаимодействия ВД с геосредой головная секция осуществляет ввинчивание в геосреду, т.е. осуществляет вращательно-поступательное перемещение. При этом головная секция вовлекает в поступательное перемещение вслед за собой стабилизирующую секцию. Вовлечение обеспечивается за счет элементов для передачи тягового усилия. Исполнительный орган (ИО) осуществляет разрушение забоя за счет напорных усилий, обеспечиваемых внешними движителями при перемещении геохода. Внешние движители и элементы противовращения оснащены исполнительными органами (ИОВД и ИОЭП), которые расположены перед ними и нарезают систему законтурных каналов в выработке (винтовых для ВД и продольных для ЭП). Таким образом, для формирования тяговых и напорных усилий геоход использует систему законтурных каналов. Отбитая горная порода грузится системой погрузки на конвейер (система транспортировки отбитой горной породы), осуществляется крепление выработки [13,11,1,2,5,4,57].

Тогда узел сопряжения секций геохода можно рассматривать как участок на стыке головной и стабилизирующей секций, в котором происходит взаимодействие секций между собой [21,20,9,10]. Исходя из характера взаимодействия систем геохода, была составлена его структурная схема (рисунок 2.1) (крепеустановщик и крепь на схеме не показаны).



Рисунок 2.1 – Структурная схема геохода

Как видно из структурной схемы (рисунок 2.1), в состав УСС геохода входят элементы для передачи тягового усилия, трансмиссия и корпус на котором они монтируются. При этом в качестве корпуса УСС могут выступать части корпусов секций геохода (т.е. монтаж трансмиссии и элементов для передачи тягового усилия производится непосредственно на корпуса секций). Также корпус УСС может быть выполнен в виде отдельных колец разного диаметра с последующим сопряжением с секциями [21]. Диаметр внешнего кольца (назовем его оболочка УСС) равен диаметру секций геохода. Внутреннее кольцо имеет меньший диаметр, но достаточный для расположения элементов для передачи тягового усилия и трансмиссии между оболочкой и внутренним кольцом корпуса УСС. В этом случае УСС геохода представляет собой отдельный модуль, сопрягаемый с секциями геохода.

# 2.2 Особенности работы геохода и формирование требований к узлу сопряжения секций геохода

Для разработки компоновочных схем и конструктивных решений необходимо сформировать требования к узлу сопряжения секций геохода. Требования должны учитывать технические параметры геохода, особенности его работы и взаимодействия с породами проводимой горной выработки.

Одной из особенностей работы геохода является принцип формирования тягового усилия и напорного усилия на исполнительном органе. Известные горные машины формируют тяговые усилия, используя поверхность на границе контакта твердой и воздушной сред. При этом увеличение напорных и тяговых усилий осуществляется, в основном, за счет увеличения массы проходческого оборудования [5–7,9,10,21]. Геоход для создания тяговых и напорных усилий использует принцип ввинчивания в горный массив. При движении он формирует и использует систему законтурных винтовых и продольных каналов (рисунок 2.2). В связи с этим, движение геохода зависит от характера взаимодействия ВД с геосредой за ним. Движение геохода в выработке возможно при наличии участка породы за ВД, способного выдерживать напорные усилия, формируемые геоходом. В случае разрушения целика породы за ВД, происходит пробуксовка геохода до момента достаточного утрамбовывания породы за ним [12,36,46,58].



Рисунок 2.2 – Система законтурных каналов, формируемая при перемещении геохода

Обеспечение тяговых и напорных усилий за счет использования системы законтурных каналов накладывает ряд требований к конструкции УСС. Конструкция УСС должна:

 – обеспечивать минимальное значение силы воздействия движителя геохода на породу контура выработки за ним;

-иметь минимальную металлоемкость;

-обеспечивать работу геохода при любых углах наклона проводимой выработки.

Как и у проходческих щитов, диаметр проводимой геоходом выработки равен диаметру проходческого агрегата. Как следствие, силы трения пород контура выработки о корпус геохода оказывают существенное сопротивление его перемещению, а транспортировка отбитой горной породы и доступ к призабойной части выработки осуществляются через внутреннее пространство геохода [2,3,6,59–63]. Также равенство диаметров геохода и проводимой выработки осложняют монтажно-демонтажные работы и ремонт узлов и оборудования геохода во время проходки. Это накладывает дополнительные требования к УСС геохода:

 – радиальные габариты УСС геохода не должны превышать диаметр оболочек секций геохода;

конструкция УСС должна иметь достаточное внутреннее пространство
 для транспортировки отбитой горной породы и доступа к призабойной
 части выработки;

– конструкция УСС должна быть ремонтопригодной и обеспечивать простоту монтажно-демонтажных работ в стесненных условиях горной выработки.

Также к УСС геохода применимо общее требование к горным машинам по обеспечению достаточной прочности конструкции [64].

Выявленные особенности работы геохода и разработанные требования к УСС представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Особенности работы геохода и требования к УСС

Особенности работы геохода.	Требования.	
	Конструкция УСС должна:	
Для создания тяговых и напорных усилий использует самостоятельно формируемую систему законтурных каналов.	<ul> <li>обеспечивать минимальное значение силы воздействия движителя геохода на породу контура выработки за ним;</li> </ul>	
Операции по проходке и крепле- нию горной выработки выполняются одновременно.	<ul> <li>обеспечивать непрерывность перемещения геохода на забой;</li> </ul>	
Создает достаточные напорные усилия на исполнительном органе при меньшей металлоемкости обору- дования (по сравнению с традицион- ным проходческим оборудованием).	<ul> <li>иметь минимальную металлоемкость;</li> <li>обладать минимальными габаритами</li> <li>в осевом направлении;</li> </ul>	

Продолжение таблицы 2.1

Особенности работы геохода.	Требования.
	Конструкция УСС должна:
Больший по сравнению с традици- онными горными машинами диапа- зон использования по углам прове- дения горных выработок.	<ul> <li>обеспечивать работу геохода при лю- бых углах наклона проводимой выра- ботки;</li> </ul>
Диаметр геохода равен диаметру проводимой горной выработки.	<ul> <li>обладать радиальными габаритами, не превышающими диаметр оболочек секций геохода;</li> <li>быть ремонтопригодной и обеспечивать простоту монтажно-демонтажных работ в стесненных условиях горной выработки;</li> </ul>
Транспортировка отбитой горной породы, а также доступ к призабой- ной части осуществляется через внутреннее пространство геохода.	<ul> <li>иметь достаточное внутреннее про- странство для транспортировки отби- той горной породы и доступа к приза- бойной части выработки;</li> </ul>
Работает в условиях горного дав- ления.	<ul> <li>обеспечивать достаточную прочность конструкции геохода;</li> <li>обеспечивать равнопрочность элементов УСС.</li> </ul>

2.3 Разработка и анализ компоновочных схем узла сопряжения секций геохода

Были выявлены три основных вариативных признака, отличающих различные компоновки УСС геохода:

1. По исполнению корпуса УСС:

1.1) в виде отдельного модуля;

1.2) как часть корпусов секций геохода.

2. По расположению колец корпуса УСС:

2.1) оболочка корпуса УСС сопряжена с головной секцией геохода (или является её частью);
2.2) оболочка корпуса УСС сопряжена со стабилизирующей секцией геохода (или является её частью).

3. По взаимному расположению трансмиссии и элементов для передачи тягового усилия:

3.1) со стороны забоя сначала располагается трансмиссия, а затем элементы для передачи тягового усилия;

3.2) со стороны забоя сначала располагаются элементы для передачи тягового усилия, а затем трансмиссия.

Общее количество вариантов компоновочных схем УСС геохода определяется по формуле:

$$N_{KOMII} = n_1 \cdot n_2 \cdot .. n_i, \qquad (2.1)$$

где  $n_1, n_2, ... n_i$  – количество вариантов исполнения УСС по *i*-ому признаку компоновки.

Исходя из количества выбранных вариативных признаков и количества вариантов исполнения по каждому из них общее количество вариантов компоновочных схем УСС геохода равно 8-ми. Разработанные компоновочные схемы УСС представлены в таблице 2.2.

Анализ разработанных компоновочных схем показывает, что все представленные в таблице 2.2 компоновочные схемы УСС геохода:

– обеспечивают непрерывность перемещения геохода на забой;

– обладают примерно равной металлоемкостью;

 обеспечивают работу геохода при любых углах наклона проводимой выработки;

обладают габаритами, не превышающими диаметр оболочек секций геохода;

– имеют равное внутреннее пространство для транспортировки отбитой горной породы и доступа к призабойной части выработки.

Влияние разработанных компоновочных схем на силу воздействия движителя геохода на породу контура выработки за ним и на обеспечение прочности конструкции геохода требует дальнейшего исследования. Компоновочные схемы УСС в виде отдельного модуля (Таблица 2.2, схемы 1-4) обладают рядом преимуществ перед схемами с корпусом УСС выполненным как часть корпусов секций геохода (Таблица 2.2, схемы 5-8):

– возможность замены, как УСС геохода, так и головной и стабилизирующей секций в зависимости от условий работы или по мере необходимых ремонтных и обслуживающих процедур (при единых присоединительных размерах и базовых поверхностях для сопряжения с секциями геохода);

– обеспечивают возможность замены УСС без демонтажа секций геохода;

– обладают большей ремонтопригодностью;

 облегчают процесс монтажно-демонтажных работ в стесненных условиях горной выработки.

В таблице 2.3 представлен анализ соответствия разработанных компоновочных схем критериям, сформированным на основании требований к УСС геохода.

		Вариативные призна	ки:	
№ схемы	1. По ис- полнению корпуса.	2. По расположе- нию колец корпуса.	3. По взаим- ному распо- ложению трансмиссии и элементов для передачи тя- гового усилия.	Компоновочная схема УСС
1	1.1) в виде отдельного модуля	2.1) оболочка корпуса УСС со- пряжена с голов- ной секцией гео- хода	3.1) со сторо- ны забоя сна- чала распола- гается транс- миссия, а за- тем элементы для передачи тягового уси- лия	алынан секция усс

Таблица 2.2 – Компоновочные схемы УСС геохода

	]	Вариативные призна	ки:	
№ схемы	1. По ис- полнению корпуса.	2. По расположе- нию колец корпуса.	3. По взаим- ному распо- ложению трансмиссии и элементов для передачи тя- гового усилия.	Компоновочная схема УСС
2	1.1) в виде отдельного модуля	2.1) оболочка корпуса УСС со- пряжена с голов- ной секцией гео- хода	3.2) со сторо- ны забоя сна- чала распола- гаются эле- менты для пе- редачи тягово- го усилия, а затем транс- миссия	Секция Секция Секция Секция Секция

	]	Вариативные призна	ки:	
№ схемы	1. По ис- полнению корпуса.	2. По расположе- нию колец корпуса.	3. По взаим- ному распо- ложению трансмиссии и элементов для передачи тя- гового усилия.	Компоновочная схема УСС
3	1.1) в виде отдельного модуля	2.2) оболочка корпуса УСС со- пряжена со ста- билизирующей секцией геохода	3.1) со сторо- ны забоя сна- чала распола- гается транс- миссия, а за- тем элементы для передачи тягового уси- лия	Секция УСС

41

	]	Вариативные призна	ки:	
№ схемы	1. По ис- полнению корпуса.	2. По расположе- нию колец корпуса.	3. По взаим- ному распо- ложению трансмиссии и элементов для передачи тя- гового усилия.	Компоновочная схема УСС
4	1.1) в виде отдельного модуля	2.2) оболочка корпуса УСС со- пряжена со ста- билизирующей секцией геохода	3.2) со сторо- ны забоя сна- чала распола- гаются эле- менты для пе- редачи тягово- го усилия, а затем транс- миссия	Сповная секция Секция Секция Секция Секция

	]	Вариативные призна	ки:	
№ схемы	1. По ис- полнению корпуса.	2. По расположе- нию колец корпуса.	3. По взаим- ному распо- ложению трансмиссии и элементов для передачи тя- гового усилия.	Компоновочная схема УСС
5	1.2) как часть кор- пусов сек- ций геохода	2.1) оболочка корпуса УСС яв- ляется частью го- ловной секции геохода	3.1) со сторо- ны забоя сна- чала распола- гается транс- миссия, а за- тем элементы для передачи тягового уси- лия	оболочка УСС заедино с головной секцией УСС

	]	Зариативные призна	ки:	
№ схемы	1. По ис- полнению корпуса.	2. По расположе- нию колец корпуса.	<ol> <li>По взаим- ному распо- ложению</li> <li>трансмиссии и</li> <li>элементов для передачи тя- гового усилия.</li> </ol>	Компоновочная схема УСС
6	1.2) как часть кор- пусов сек- ций геохода	2.1) оболочка корпуса УСС яв- ляется частью го- ловной секции геохода	3.2) со сторо- ны забоя сна- чала распола- гаются эле- менты для пе- редачи тягово- го усилия, а затем транс- миссия	аболочка УСС заедино с голавной секцией УСС

	]	Вариативные призна	ки:	
№ схемы	1. По ис- полнению корпуса.	2. По расположе- нию колец корпуса.	3. По взаим- ному распо- ложению трансмиссии и элементов для передачи тя- гового усилия.	Компоновочная схема УСС
7	1.2) как часть кор- пусов сек- ций геохода	2.2) оболочка корпуса УСС яв- ляется частью стабилизирующей секции геохода	3.1) со сторо- ны забоя сна- чала распола- гается транс- миссия, а за- тем элементы для передачи тягового уси- лия	Внутреннее кольца УСС заедино с голавной секцией УСС

45

	]	Зариативные призна	ки:	
№ схемы	1. По ис- полнению корпуса.	2. По расположе- нию колец корпуса.	<ol> <li>По взаим- ному распо- ложению</li> <li>трансмиссии и</li> <li>элементов для передачи тя- гового усилия.</li> </ol>	Компоновочная схема УСС
8	1.2) как часть кор- пусов сек- ций геохода	2.2) оболочка корпуса УСС яв- ляется частью стабилизирующей секции геохода	3.2) со сторо- ны забоя сна- чала распола- гаются эле- менты для пе- редачи тягово- го усилия, а затем транс- миссия	внутреннее кольцо УСС заедино с головной секцией УСС

<u> Ne компоновочной схемы</u>	Минимальное влияние на рост силы воздействия движителя геохода на геосреду за ним	Обеспечение непрерывности переме- шения геохода на забой	Минимальная металлоемкость	Работа при любых углах наклона выработки	Радиальные габариты не превышают диаметр оболочек секций геохода	Ремонтопригодность и простота монтажно-демонтажных работ	Обеспечение свободного пространства внутри геохода	Обеспечение достаточной прочности конструкции геохода	Суммарная оценка
1	т.д.и.	+	+	+	+	+	+	т.д.и.	«+» - 6; «-» - 0; «т.д.и.» - 2
2	т.д.и.	+	+	+	+	+	+	т.д.и.	«+» - 6; «-» - 0; «т.д.и.» - 2
3	т.д.и.	+	+	+	+	+	+	т.д.и.	«+» - 6; «-» - 0; «т.д.и.» - 2
4	т.д.и.	+	+	+	+	+	+	т.д.и.	«+» - 6; «-» - 0; «т.д.и.» - 2
5	т.д.и.	+	+	+	+	-	+	т.д.и.	«+» - 5; «-» - 1; «т.д.и.» - 2
6	т.д.и.	+	+	+	+	-	+	т.д.и.	«+» - 5; «-» - 1; «т.д.и.» - 2
7	т.д.и.	+	+	+	+	-	+	т.д.и.	«+» - 5; «-» - 1; «т.д.и.» - 2
8	т.д.и.	+	+	+	+	-	+	т.д.и.	«+» - 5; «-» - 1; «т.д.и.» - 2
<u> </u>	$- cxe_{Ma} y$	довле	тво	ряет к	ритери	ю;			

$1 a$ олица 2.3 – Апализ компоновочных слем $J \subset C I coло,$	Таблица 2.3 -	- Анализ	компоновочных	схем	УСС	геоход
---	---------------	----------	---------------	------	-----	--------

«-» – схема не удовлетворяет критерию;

«т.д.и.» – требуются дальнейшие исследования в связи с отсутствием данных о влиянии схемы на критерий

В результате анализа разработанных компоновочных схем установлено, что схемы 1-4 соответствуют требованиям к УСС геохода в большей степени, чем схемы 5-8, т.к. обладают большей ремонтопригодностью и облегчают процесс монтажно-демонтажных работ в стесненных условиях горной выработки. Таким образом, к дальнейшей проработке приняты компоновочные схемы УСС 1-4.

2.4 Разработка и анализ конструктивных решений узла сопряжения секций геохода

Во всех рассмотренных вариантах компоновочных схем (таблица 2.2, схемы 1-4) узел сопряжения секций геохода содержит трансмиссию, элементы для передачи тягового усилия и корпус, состоящий из оболочки и внутреннего кольца.

За базовую конструкцию при разработке конструктивных решений была принята трансмиссия геохода на основе гидроцилиндров, расположенных в два ряда и работающих в противофазе. Данная конструкция была предложена в работах Блащука М.Ю. и др. [6,65]. Схема работы трансмиссии геохода с гидроцилиндрами, работающими в противофазе, представлена на рисунке 2.3. Согласно принятой схеме работы трансмиссии, в каждый момент времени поочередно половина гидроцилиндров находится в фазе выдвижения, а вторая половина в фазе складывания.



Рисунок 2.3 – Схема работы трансмиссии геохода с гидроцилиндрами, работающими в противофазе [6]

При компоновочных схемах 1 и 2 оболочка корпуса УСС сопряжена с головной секцией и осуществляет вместе с ней поступательно-вращательное пере-

мещение. Внутреннее кольцо УСС при этом сопрягается со стабилизирующей секцией и осуществляет вместе с ней только поступательное перемещение. При компоновочных схемах 3 и 4 – наоборот. Также для рассматриваемых схем различается порядок монтажа трансмиссии и элементов для передачи тягового усилия. На схемах 1 и 3 со стороны забоя сначала располагается трансмиссия, а затем элементы для передачи тягового усилия. Для схем 2 и 4 – наоборот. В остальном оболочка и внутреннее кольцо корпуса УСС геохода для всех рассматриваемых компоновочных схем имеют схожую конструкцию.

Таким образом, при разработке конструктивных решений, их основное отличие заключается в конструкции элементов для передачи тягового усилия.

Разработанные конструктивные решения УСС геохода для рассматриваемых компоновочных схем представлены на рисунках 2.4-2.8.

На рисунке 2.4 представлено конструктивное решение УСС на основе катков (колес малого диаметра) по аналогии с конструкцией ОПУ универсальных полноповоротных экскаваторов. К достоинствам конструктивного решения на основе катков можно отнести простоту изготовления и замены катков. Однако данное конструктивное решение обладает рядом существенных недостатков [20]:

 неизвестны варианты конструкции каткового устройства без центрирующей цапфры, которая воспринимает осевые усилия (она должна располагаться по оси устройства, но при этом не выполняется требование к УСС по наличию свободного пространства внутри геохода);

– нагрузки от тяговых усилий приходятся на оси катков с малым сечением.

На рисунках 2.5-2.8 представлены конструктивные решения УСС геохода с элементами для передачи тягового усилия, построенными по принципу подшипникового узла. К общим достоинствам данных решений можно отнести высокую надежность и возможность работы при больших осевых усилиях [20].

На рисунках 2.5 и 2.6 представлены конструктивные решения УСС геохода в виде подшипникового узла с промежуточными телами качения между элементами для передачи тягового усилия (роликами на рисунке 2.5 и шариками на рисунке 2.6). Недостатками данных решений являются [20]: - сложность изготовления;

сложность сборки узла;

– малая ремонтопригодность в условиях горной выработки;

– необходимость в постоянном техническом обслуживании.

На рисунках 2.7 и 2.8 представлены конструктивные решения УСС геохода в виде подшипникового узла с элементами для передачи тягового усилия, построенными по принципу подшипникового узла скольжения. На рисунке 2.7 с промежуточными телами скольжения (прокладка из антифрикционного материала) между элементами для передачи тягового усилия. На рисунке 2.8 без промежуточных тел. К недостаткам данных решений можно отнести большие потери на трение и большое изнашивание трущихся элементов. При этом данные решения обладают рядом преимуществ перед другими конструктивными решениями:

– виброустойчивость;

- возможность изготовления разъемной конструкции;

простота изготовления;

– небольшие габариты в осевом направлении.

Помимо указанных преимуществ, при использовании конструктивных решений УСС геохода по рисункам 2.7 и 2.8 возможна модернизация элементов для передачи тягового усилия. Элемент для передачи тягового усилия на внутреннем кольце УСС может быть выполнен в виде сегментных вставок (сухарей). Это позволит снизить металлоемкость УСС, улучшить его собираемость и ремонтопригодность в условиях проводимой горной выработки. Также возможно использование антифрикционных покрытий и/или смазки сухарей вместо сплошной антифрикционной прокладки.

В таблице 2.4 представлен анализ соответствия представленных конструктивных решений критериям, разработанным на основе требований, предъявляемых к УСС геохода. В ходе анализа однотипные конструкции (рисунки 2.5 и 2.6 – конструкции в виде подшипникового узла качения; рисунки 2.7 и 2.8 – конструкции в виде подшипникового узла скольжения) были объединены в группы, т.к. имеют одинаковые достоинства и недостатки.



а) для компоновочной схемы №1; б) для компоновочной схемы №2;

в) для компоновочной схемы №3; г) для компоновочной схемы №4.

1 – головная секция, 2 – стабилизирующая секция, 3- оболочка УСС, 4 – внутреннее кольцо УСС, 5 – трансмиссия, 6 – элемент для передачи тягового усилия на внутреннем кольце УСС, 7 – элемент для передачи тягового усилия на оболочке УСС, 8 – каток (колесо)

Рисунок 2.4 – Конструктивное решение УСС геохода на основе катков



а) для компоновочной схемы №1, б) для компоновочной схемы №2, в) для компоновочной схемы №3, г) для компоновочной схемы №4.



Рисунок 2.5 – Конструктивное решение УСС геохода с роликами в качестве промежуточных тел качения



а) для компоновочной схемы  $\mathfrak{N}_{2}1, \mathfrak{G})$  для компоновочной схемы  $\mathfrak{N}_{2}2,$ 

в) для компоновочной схемы №3, г) для компоновочной схемы №4.

1 – головная секция, 2 – стабилизирующая секция, 3- оболочка УСС, 4 – внутреннее кольцо УСС, 5 – трансмиссия, 6 – элемент для передачи тягового усилия на внутреннем кольце УСС, 7 – элемент для передачи тягового усилия на оболочке УСС, 8 – шарик

Рисунок 2.6 – Конструктивное решение УСС геохода с шариками в качестве промежуточных тел качения



а) для компоновочной схемы №1, б) для компоновочной схемы №2,
в) для компоновочной схемы №3, г) для компоновочной схемы №4.
1 – головная секция, 2 – стабилизирующая секция, 3- оболочка УСС, 4 – внутреннее кольцо УСС, 5 – трансмиссия,
6 – элемент для передачи тягового усилия на внутреннем кольце УСС, 7 – элемент для передачи тягового усилия на оболочке УСС, 8 – прокладка из антифрикционного материала (тело скольжения).
Рисунок 2.7 – Конструктивное решение УСС геохода с промежуточными телами скольжения



а) для компоновочной схемы №1, о) для компоновочной схемы №2, в) для компоновочной схемы №3, г) для компоновочной схемы №2.

1 – головная секция, 2 – стабилизирующая секция, 3- оболочка УСС, 4 – внутреннее кольцо УСС, 5 – трансмиссия,

6 – элемент для передачи тягового усилия на внутреннем кольце УСС, 7 – элемент для передачи тягового усилия на оболочке УСС

Рисунок 2.8 – Конструктивное решение УСС геохода без промежуточных тел скольжения

Вид конструктивного решения	Минимальное влияние на рост силы воздействия движителя геохода на по- роду контура выработки за ним	Обеспечение непрерывности переме- щения геохода на забой	Минимальная металлоемкость	Работа при любых углах наклона вы- работки	Радиальные габариты не превышают диаметр оболочек секций геохода	Ремонтопригодность и простота монтажно-демонтажных работ	Обеспечение свободного пространства внутри геохода	Обеспечение достаточной прочности конструкции геохода	Суммарная оценка						
Рису-	тпи		±/_						«+» - 5; «+/-» - 1;						
2.4	1.д.и.		1/-	I	1	I	1	_	«-» - 1; «т.д.и.» - 1						
Ри-															
сунки 2.5 и 2.6	т.д.и.	+	+/-	+	+	-	+	+	«+» - 4; «+/-» - 1; «-» - 1; «т.д.и.» - 1						
<u>2.0</u> Ри-															
сунки 2.7 и 2.8	т.д.и.	+	+	+	+	+	+	+	«+» - 6; «+/-» - 0; «-» - 0; «т.д.и.» - 1						
«+» – p															
«+/ <b>-</b> » –	решение	е части	ично	удовл	етворяе	ет кри	герию;								
«-» – pe	ешение н	іе удол	влетг	зоряет	критер	«-» – решение не удовлетворяет критерию;									

Таблица 2.4 – А	нализ констру	уктивных	решений У	ИСС геохода
1		/		r 1

«т.д.и.» – требуются дальнейшие исследования в связи с отсутствием данных о влиянии решения на критерий.

В результате анализа разработанных конструктивных решений установлено, что решения с элементами для передачи тягового усилия, построенными по принципу подшипникового узла скольжения (Рисунки 2.7, 2.8) в наибольшей степени соответствуют требованиям, предъявляемым к УСС геохода. Для дальнейшей проработки был выбран вариант конструктивного решения без промежуточных тел скольжения, как наиболее простой в исполнении.

### 2.5 Выводы

1. Разработана структурная схема УСС. Определено, что в состав УСС геохода входят элементы для передачи тягового усилия, трансмиссия и корпус, состоящий из двух колец, на котором они монтируются.

2. Определены особенности работы геохода на основе которых сформированы требования к УСС геохода. Конструкция УСС должна:

 – обеспечивать минимальное значение силы воздействия движителя геохода на породу контура выработки за ним;

– обеспечивать непрерывность перемещения геохода на забой;

- иметь минимальную металлоемкость;

– обладать минимальными габаритами в осевом направлении;

 обеспечивать работу геохода при любых углах наклона проводимой выработки;

 обладать радиальными габаритами, не превышающими диаметр оболочек секций геохода;

– быть ремонтопригодной и обеспечивать простоту монтажнодемонтажных работ в стесненных условиях горной выработки;

 иметь достаточное внутреннее пространство для транспортировки отбитой горной породы и доступа к призабойной части выработки;

– обеспечивать достаточную прочность конструкции геохода;

– обеспечивать равнопрочность элементов УСС.

3. Выявлены три основных вариативных признака, отличающих различные компоновки УСС, по которым предложены различные варианты компоновочных схем УСС геохода (Таблица 2.2). В ходе анализа установлено, что компоновочные схемы УСС геохода в виде отдельного модуля (Таблица 2.2, схемы 1-4) в наибольшей степени удовлетворяют критериям, сформированным на основе требований к УСС геохода.

4. Необходимо создание модульной конструкции узла сопряжения секций с едиными присоединительными размерами и базовыми поверхностями. При этом

упрощается его изготовление и сборка. Возможна замена, как узла сопряжения, так и головной и стабилизирующей секций в зависимости от условий работы или по мере необходимых ремонтных и обслуживающих процедур.

5. Предложены конструктивные решения УСС геохода (Рисунки 2.4-2.8). В результате проведенного анализа установлено, что конструктивные решения с элементами для передачи тягового усилия, построенными по принципу подшипникового узла скольжения (Рисунки 2.7, 2.8) в наибольшей степени удовлетворяют критериям, сформированным на основе требований к УСС геохода. Для дальнейшей проработки был выбран вариант конструктивного решения без промежуточных тел скольжения, как наиболее простой в исполнении.

## **З АДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ** ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОХОДА С ГЕОСРЕДОЙ

Для обоснования конструктивных параметров УСС геохода необходимо определить влияние предложенных ранее вариантов компоновочных схем УСС на усилия, действующие на геоход во время его перемещения. Для определения данных усилий воспользуемся математической моделью взаимодействия ВПА ЭЛАНГ-4 с геосредой, предложенной Аксеновым В.В. [4,11] и использовавшейся в работах Блащука М.Ю., Тимофеева В.Ю., Ефременкова А.Б. и др. [5–7,57,66]. В связи с наличием ряда конструктивных отличий разрабатываемого опытного образца геохода от ВПА ЭЛАНГ-4 требуется адаптация предложенной математической модели.

# 3.1 Определение влияния компоновочной схемы узла сопряжения секций на массогабаритные параметры вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода

Одним из основных конструктивных отличий разрабатываемого опытного образца геохода от ВПА ЭЛАНГ-4 является наличие в его конструкции узла сопряжения секций. Конструкция УСС геохода может быть выполнена по различным вариантам компоновочных схем. Во второй главе, в ходе анализа компоновочных схем УСС геохода, были определены четыре варианта компоновок, которые в наибольшей степени удовлетворяют критериям, сформированным на основании требований к УСС (Таблица 2.2, схемы 1-4).

При 1-ой и 2-ой компоновочных схемах оболочка УСС сопряжена с головной секцией геохода и осуществляет вместе с ней поступательно-вращательное перемещение на забой. В этом случае, сопряженные между собой оболочку УСС и головную секцию геохода можно рассматривать как единую часть корпуса геохода с одинаковым характером взаимодействия с окружающей горной породой выработки (вращающаяся часть корпуса геохода). При этом внутреннее кольцо корпуса УСС сопряжено со стабилизирующей секцией геохода и осуществляет с ней только поступательное перемещение на забой. Тогда, сопряженные между собой внутреннее кольцо УСС и стабилизирующую секцию геохода можно рассматривать как единую не вращающуюся часть корпуса геохода (Рисунок 3.1,а).



Невращающаяся часть корпуса геохода

а) оболочка УСС сопряжена с головной секцией геохода (при компоновочных схемах УСС 1,2); б) оболочка УСС сопряжена со стабилизирующей секцией геохода (при компоновочных схемах УСС 3,4)

Рисунок 3.1 – Схемы влияния компоновки УСС на массогабаритные

параметры вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода

При 1-ой и 2-ой компоновочных схемах УСС силы тяжести, действующие на вращающуюся и не вращающуюся части корпуса геохода определяются по формулам:

$$G_{BP} = G_{\Gamma} + G_{OE}^{VCC} + G_{OFM}$$
(3.1)

$$G_{HBP} = G_{CT} + G_{BH}^{VCC} + G_{TTM}, \qquad (3.2)$$

где G<sub>Г</sub> – сила тяжести, действующая на головную секцию геохода, H;
 G<sub>CT</sub> – сила тяжести, действующая на стабилизирующую секцию, H;
 G<sup>VCC</sup><sub>OS</sub> – сила тяжести, действующая на оболочку VCC, H;
 G<sup>VCC</sup><sub>BH</sub> – сила тяжести, действующая на внутреннее кольцо корпуса VCC, H;
 G<sub>OTM</sub> – сила тяжести, действующая на отбитую горную массу, находящую ся внутри головной секции геохода, H;

*G*<sub>*TTM</sub> – сила тяжести, действующая на транспортируемую горную массу, находящуюся внутри стабилизирующей секции геохода, Н.</sub>* 

При 1-ой и 2-ой компоновочных схемах УСС, длины участков вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода, находящиеся в контакте с окружающей горной породой выработки определяются по формулам:

$$l_{BP} = l_{\Gamma C} + l_{VCC} \tag{3.3}$$

$$l_{HBP} = l_{CT}, \qquad (3.4)$$

где  $l_{rc}$  – длина головной секции геохода, м;

 $l_{\scriptscriptstyle CT}$  — длина стабилизирующей секции геохода, м;

 $l_{vcc}$  – длина оболочки УСС геохода, м.

При 3-ей и 4-ой компоновочных схемах оболочка УСС сопряжена со стабилизирующей секцией геохода и осуществляет вместе с ней поступательное перемещение на забой, т.е. составляют не вращающуюся часть корпуса геохода. Внутреннее кольцо корпуса УСС сопряжено с головной секцией геохода и составляют вращающуюся часть корпуса геохода (Рисунок 3.1,б).

При 3-ей и 4-ой компоновочных схемах УСС силы тяжести, действующие на вращающуюся и не вращающуюся части корпуса геохода определяются по формулам:

$$G'_{BP} = G_{\Gamma} + G^{VCC}_{BH} + G_{OFM}$$
(3.5)

$$G'_{HBP} = G_{CT} + G_{OE}^{VCC} + G_{TTM}$$
(3.6)

При 3-ей и 4-ой компоновочных схемах УСС, длины участков вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода, находящихся в контакте с окружающей горной породой выработки определяются по формулам:

$$l'_{BP} = l_{\Gamma C}, \qquad (3.7)$$

$$l'_{HBP} = l_{CT} + l_{VCC}$$
(3.8)

Среди других конструктивных отличий разрабатываемого опытного образца геохода от ВПА ЭЛАНГ-4 стоит отметить наличие двухзаходного внешнего движителя, барабанного исполнительного органа главного забоя и законтурных исполнительных органов.

# **3.2** Определение усилий, действующих на геоход во время его перемещения

С учетом рассмотренных конструктивных отличий, была произведена адаптация расчетной схемы для определения усилий, действующих на геоход во время его перемещения (Рисунок 3.2) [67,68]. При 1-ой и 2-ой компоновочных схемах оболочка УСС сопрягается с головной секцией геохода по секущей плоскости *a-a*, а массогабаритные параметры вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода определяются по формулам (3.1-3.4). При 3-ей и 4-ой компоновочных схемах оболочка УСС сопрягается со стабилизирующей секцией геохода по секущей плоскости *b-b*, а массогабаритные параметры вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода определяются по формулам (3.5-3.8). Усилия от исполнительных органов приложены в соответствии с рекомендациями, предложенными в работах Ананьева К.А. и Ермакова А.Н. [35,36]. Обозначения, примененные на схеме, приведены в таблице 3.1.



Рисунок 3.2 – Расчетная схема для определения усилий, действующих на геоход во время его перемещения

Таблица3.1 – Обозначения к расчетной схеме (Рисунок 3.2) [67]

Обозна- чение величи- ны	Едини- цы из- мерения	Наименование
$F_{_T}$	Н	суммарная сила тяги внешнего движителя
$F_{_{B3}}$	Н	сила взаимодействия между вращающейся и не вращаю- щейся частями корпуса геохода (на элементах для передачи тягового усилия УСС геохода)
$P_{\scriptscriptstyle H}^{\scriptscriptstyle BP}$	Н	нормальная составляющая нагрузок от горного давления на вращающуюся часть корпуса геохода
$P_{\!\scriptscriptstyle H}^{\scriptscriptstyle HBP}$	Н	нормальная составляющая нагрузок от горного давления на не вращающуюся часть корпуса геохода
R <sub>o</sub>	Н	проекция результирующей силы на ось вращения геохода от работы исполнительного органа главного забоя
R <sub>вд</sub> R <sub>эп</sub>	Н	суммарная реакция геосреды на внешний движитель и эле- менты противовращения геохода соответственно
R <sub>иовдн</sub> R <sub>иоэпн</sub>	Н	суммарные нормальных составляющих усилий внедрения исполнительных органов внешних движителей и элементов противовращения в приконтурный массив при движении геохода соответственно
Т <sub>вд</sub> Т <sub>эп</sub>	Н	сила трения внешнего движителя и суммарные силы трения элементов противовращения об вмещающую породу соот- ветственно
$T_{\scriptscriptstyle O\!E}^{\scriptscriptstyle BP}$	Н	суммарные силы трения оболочек вращающейся и не вра- щающейся частей корпуса геохода об вмещающую породу

Обозна-	Едини-	
чение	цы из <b>-</b>	Цаньконоронно
величи-	мерения	паименование
ны		
$T_{\scriptscriptstyle O\!E}^{\scriptscriptstyle HBP}$		соответственно
M <sub>BP</sub>	Н∙м	требуемый вращающий момент трансмиссии геохода
$M_{\scriptscriptstyle TP}^{\scriptscriptstyle YCC}$	Н∙м	реактивный вращающий момент от силы трения на элемен- тах для передачи тягового усилия УСС геохода
M <sub>IIO</sub>		вращающий момент сопротивления резанию на исполни-
M	Н∙м	тельном органе главного забоя, исполнительных органах
<b>IVI</b> ИОВД		внешних движителей и исполнительных органах элементов
М <sub>иоэп</sub>		противовращения соответственно
<b>M</b> <sub><i>ГМ</i></sub>	Н∙м	вращающий момент, необходимый для перемещения раз- рушенной породы из нижней части геохода вверх
$egin{array}{c} G_{_{BP}} \ G_{_{HBP}} \end{array}$	Н	силы тяжести, действующие на вращающуюся и не вра- щающуюся части корпуса геохода соответственно
$r_{\Gamma} = r_{CT}$	М	радиусы головной и стабилизирующей секций (по оболоч- ке)
h <sub>эп</sub>	М	высота элементов противоврашения и внешних лвижителей
$h_{\scriptscriptstyle B\!I\!I}$		геохода соответственно
α	град	угол подъёма выработки
β	град	угол подъёма внешнего движителя
ω	c <sup>-1</sup>	угловая скорость вращения головной секции геохода

Для обеспечения достоверности математической модели, примем допущения [5,7,6,67,68]:

 оболочка (корпусы секций и оболочка УСС) геохода обладает абсолютной жесткостью;

взаимодействие корпуса геохода с окружающими породами происходит
 в условиях сухого трения;

 силовое проявление горного давления равномерно распределено по оболочке геохода.

При перемещении геохода в выработке тяговое усилие на внешнем движителе должно превышать сумму сил сопротивления резанию исполнительных органов главного забоя и внешних движителей, а также сумму сил сопротивления передвижению вращающейся части корпуса геохода в выработке. Вращающий момент трансмиссии должен превышать сумму вращающих моментов сопротивления резанию исполнительных органов главного забоя и внешних движителей, а также сумму вращающих моментов сопротивления вращения вращающейся части корпуса геохода в геосреде [4–8,11,13,36,37,66–69]. Тогда для вращающейся части корпуса геохода справедливы уравнения:

$$F_{T} - \sum F_{CP1} - \sum F_{CQ1} = m_{BP} \cdot a , \qquad (3.9)$$

$$M_{BP} - \sum M_{CP1} - \sum M_{CB1} = J \cdot \varepsilon$$
(3.10)

Сила взаимодействия вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода должна превышать сумму сил сопротивления резанию исполнительных органов элементов противовращения, а также сумму сил сопротивления передвижению не вращающейся части корпуса геохода в выработке[4–8,11,13,36,37,66–69]. Тогда для не вращающейся части корпуса геохода справедливо уравнение:

$$F_{B3} - \sum F_{CP2} - \sum F_{CZ2} = m_{HBP} \cdot a, \qquad (3.11)$$

где  $\sum F_{CP1}$  – сумма сил сопротивления разрушению породы главным исполнительным органом и исполнительными органами внешних движителей геохода, H;  $\sum F_{CZ1}$  – сумма сил сопротивления движению геохода в геосреде для вращающейся части корпуса, H;

 $\sum M_{CP1}$  – сумма вращающих моментов сопротивления разрушению породы на главном исполнительном органе и исполнительных органах внешних движителей геохода, Н·м;

 $\sum M_{CB1}$  – сумма моментов сопротивления вращению вращающейся части корпуса геохода, Н·м;

 $\sum F_{CP2}$  – сумма сил сопротивления разрушению породы исполнительными органами элементов противовращения геохода, Н;

 $\sum F_{CD2}$  – сумма сил сопротивления движению геохода в геосреде для не вращающейся части корпуса, H;

*m*<sub>BP</sub> – суммарная масса вращающейся части корпуса геохода со смонтированным на ней оборудованием и отбитой горной массой, кг;

*m<sub>HBP</sub>* – суммарная масса не вращающейся части корпуса геохода со смонтированным на ней оборудованием и транспортируемой горной массой, кг;

a – линейное ускорение геохода, м/с<sup>2</sup>;

J – момент инерции поперечного сечения геохода, кг·м<sup>2</sup>;

 $\varepsilon$  – угловое ускорение геохода, с<sup>-2</sup>.

Исходя из рассматриваемой расчетной схемы составляющие уравнений (3.9 – 3.11) определяются по выражениям:

$$\sum F_{CP1} = R_O + R_{HOBJH} \cdot \sin\beta$$
(3.12)

$$\sum F_{C\mathcal{I}1} = G_{BP} \cdot \sin \alpha + T_{B\mathcal{I}} \cdot \sin \beta + T_{OE}^{BP} \cdot \sin \beta + F_{B3}$$
(3.13)

$$\sum M_{CP1} = M_{HOBJ} - M_{HO} \tag{3.14}$$

$$\sum M_{CB1} = M_{\Gamma M} + T_{B\overline{A}} \cdot \left( r_{\Gamma} + \frac{h_{B\overline{A}}}{2} \right) \cdot \cos \beta + R_{B\overline{A}} \cdot \left( r_{\Gamma} + \frac{h_{B\overline{A}}}{2} \right) \cdot \sin \beta + T_{O\overline{b}}^{BP} \cdot r_{\Gamma} \cdot \cos \beta + M_{TP}^{VCC}$$
(3.15)

$$\sum F_{CP2} = R_{HO3\Pi H} \tag{3.16}$$

$$\sum F_{CA2} = T_{OB}^{HBP} + G_{HBP} \cdot \sin \alpha + T_{\Im II}$$
(3.17)

Подставим полученные значения составляющих (3.12-3.17) в уравнения (3.9-3.11):

$$F_{T} - R_{O} - R_{HOB,ZH} \cdot \sin\beta - G_{BP} \cdot \sin\alpha - T_{BZ} \cdot \sin\beta - - T_{OB}^{BP} \cdot \sin\beta - F_{B3} = m_{BP} \cdot a$$
(3.18)

$$M_{BP} - M_{HOBA} + M_{HO} - M_{\Gamma M} - T_{BA} \cdot \left(r_{\Gamma} + \frac{h_{BA}}{2}\right) \cdot \cos\beta - R_{BA} \cdot \left(r_{\Gamma} + \frac{h_{BA}}{2}\right) \cdot \sin\beta - T_{OE}^{BP} \cdot r_{\Gamma} \cdot \cos\beta - M_{TP}^{VCC} = J \cdot \varepsilon$$

$$(3.19)$$

$$F_{B3} - R_{HO3\Pi H} - T_{OE}^{HBP} - G_{HBP} \cdot \sin \alpha - T_{3\Pi} = m_{HBP} \cdot a \qquad (3.20)$$

В случае равномерного прямолинейного перемещения геохода линейное *а* и угловое *є* ускорения геохода будут равняться нулю. В этом случае, на основании уравнений (3.18-3.20), составим систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} F_{T} - R_{O} - R_{HOB,ZH} \cdot \sin\beta - G_{BP} \cdot \sin\alpha - T_{BZ} \cdot \sin\beta - \\ - T_{OE}^{BP} \cdot \sin\beta - F_{B3} = 0 \end{cases} \\ M_{BP} - M_{HOB,Z} + M_{HO} - M_{TM} - T_{BZ} \cdot \left(r_{\Gamma} + \frac{h_{BZ}}{2}\right) \cdot \cos\beta - \\ - R_{BZ} \cdot \left(r_{\Gamma} + \frac{h_{BZ}}{2}\right) \cdot \sin\beta - T_{OE}^{BP} \cdot r_{\Gamma} \cdot \cos\beta - M_{TP}^{VCC} = 0 \\ F_{B3} - R_{HO3,TH} - T_{OE}^{HBP} - G_{HBP} \cdot \sin\alpha - T_{3,T} = 0 \end{cases}$$
(3.21)

Значение силы трения внешнего движителя геохода об вмещающую породу  $T_{_{BJ}}$  определено в работе [4]:

$$T_{B\mathcal{I}} = \left| R_{B\mathcal{I}} \right| \cdot tg \, \varphi_{TP} \,, \tag{3.22}$$

где  $\varphi_{TP} = \operatorname{arctg} f_{TP},$  (3.23)

где  $f_{TP}$ - коэффициент трения стали по породе в условиях сухого трения. Тогда выражение (3.22) примет вид:

$$T_{B\mathcal{I}} = \left| R_{B\mathcal{I}} \right| \cdot f_{TP} \tag{3.24}$$

Значения силы тяги внешнего движителя  $F_T$ и суммарной силы трения элементов противовращения об вмещающую породу  $T_{3\pi}$  также определены в работе [4]:

$$F_{T} = R_{BI} \cdot \cos\beta \tag{3.25}$$

$$T_{\Im\Pi} = \frac{M_{BP}}{\left(r_{\Gamma} + \frac{h_{\Im\Pi}}{2}\right)} \cdot f_{TP}$$
(3.26)

Реактивный вращающий момент от силы трения на элементах для передачи тягового усилия  $M_{TP}^{VCC}$  определяется по выражению:

$$M_{TP}^{VCC} = F_{B3} \cdot f_{TP1} \cdot r_{KCP}$$
(3.27)

где  $f_{TP1}$  – коэффициент трения стали по стали;

*r<sub>КСР</sub>* – средний радиус на кольце контакта элементов для передачи тягового усилия, м.

Средний радиус на кольце контакта элементов для передачи тягового усилия определим по выражению:

$$r_{\rm KCP} = r_{\rm K2} + \frac{r_{\rm K1} - r_{\rm K2}}{2} \tag{3.28}$$

где *r<sub>K1</sub>* – наружный радиус кольца контакта элементов для передачи тягового усилия, м;

*r*<sub>K2</sub> – внутренний радиус кольца контакта элементов для передачи тягового усилия, м.

Подставим выражения (3.24-3.27) в уравнения системы (3.21) и приведем подобные. Получим систему из трех уравнений с тремя неизвестными ( $M_{BP}$ ,  $F_{B3}$ ,  $R_{BA}$ ):

$$\begin{cases} R_{BA} \cdot (\cos \beta - f_{TP} \cdot \sin \beta) - R_{O} - R_{HOBAH} \cdot \sin \beta - G_{BP} \cdot \sin \alpha - \\ -T_{Ob}^{BP} \cdot \sin \beta - F_{B3} = 0 \end{cases} \\ M_{BP} - M_{HOBA} + M_{HO} - M_{TM} - R_{BA} \cdot \left(r_{\Gamma} + \frac{h_{BA}}{2}\right) \cdot \left(f_{TP} \cdot \cos \beta - \sin \beta\right) - \\ -T_{Ob}^{BP} \cdot r_{\Gamma} \cdot \cos \beta - F_{B3} \cdot f_{TP1} \cdot r_{KCP} = 0 \end{cases}$$
(3.29)  
$$F_{B3} - R_{HOBTH} - T_{Ob}^{HBP} - G_{HBP} \cdot \sin \alpha - \frac{M_{BP}}{\left(r_{\Gamma} + \frac{h_{BA}}{2}\right)} \cdot f_{TP} = 0$$

Из последнего уравнения системы (3.29) выразим составляющую  $F_{B3}$ :

$$F_{B3} = R_{HO3\Pi H} + T_{OE}^{HBP} + G_{HBP} \cdot \sin \alpha + \frac{M_{BP}}{\left(r_{\Gamma} + \frac{h_{3\Pi}}{2}\right)} \cdot f_{TP}$$
(3.30)

Из второго уравнения системы (3.29), с учетом выражения (3.30), выразим составляющую  $M_{BP}$ :

$$M_{BP} = \frac{\begin{pmatrix} M_{HOB,I} - M_{HO} + M_{FM} + T_{OE}^{BP} \cdot r_{F} \cdot \cos\beta + \\ + \left(R_{HO3,IIH} + T_{OE}^{HBP} + G_{HBP} \cdot \sin\alpha\right) \cdot f_{TP1} \cdot r_{KCP} - \sum P \cdot k_{1} \end{pmatrix} \cdot \left(r_{F} + \frac{h_{3II}}{2}\right)}{k_{2}}, \quad (3.31)$$

$$k_{1} = \frac{\left(r_{T} + \frac{h_{BA}}{2}\right) \cdot \left(\sin\beta - f_{TP} \cdot \cos\beta\right)}{\cos\beta - f_{TP} \cdot \sin\beta},$$
(3.32)

где

$$k_{2} = f_{TP} \cdot k_{1} - f_{TP} \cdot f_{TP1} \cdot r_{KCP} + r_{\Gamma} + \frac{h_{\Im\Pi}}{2}.$$
(3.33)

$$\sum P = R_O + R_{HOB,ZH} \cdot \sin \beta + (G_{BP} + G_{HBP}) \cdot \sin \alpha + T_{OE}^{BP} \cdot \sin \beta + R_{HO3,TH} + T_{OE}^{HBP}$$
(3.34)

Подставим выражение (3.31) в выражение (3.30) и приведем подобные:

$$F_{B3} = R_{HO3\Pi H} + T_{OE}^{HBP} + G_{HBP} \cdot \sin \alpha + \frac{\left(M_{HOBA} - M_{HO} + M_{TM} + T_{OE}^{BP} \cdot r_{T} \cdot \cos \beta + + \left(\frac{4}{k_{HO3\Pi H}} + T_{OE}^{HBP} + G_{HBP} \cdot \sin \alpha\right) \cdot f_{TP1} \cdot r_{KCP} - \sum P \cdot k_{1}\right) \cdot f_{TP}}{k_{2}}$$
(3.35)

Из первого уравнения системы (3.29) выразим составляющую *R*<sub>B</sub>:

$$R_{BA} = \frac{R_{O} + R_{MOBAH} \cdot \sin\beta + G_{BP} \cdot \sin\alpha + T_{OE}^{BP} \cdot \sin\beta + F_{B3}}{\cos\beta - f_{TP} \cdot \sin\beta}$$
(3.36)

Подставим выражение (3.35) в выражение (3.36) и приведем подобные:

$$R_{BA} = \frac{\sum P \cdot k_2 + \begin{pmatrix} M_{HOBA} - M_{HO} + M_{FM} + T_{OE}^{BP} \cdot r_F \cdot \cos\beta + \\ + (R_{HO3FH} + T_{OE}^{HBP} + G_{HBP} \cdot \sin\alpha) \cdot f_{TP1} \cdot r_{KCP} - \sum P \cdot k_1 \end{pmatrix} \cdot f_{TP}}{k_2 \cdot (\cos\beta - f_{TP} \cdot \sin\beta)}$$
(3.37)

### 3.3 Формирование исходных данных

Рассмотрим составляющие выражений (3.1-3.37). Представленная математическая модель является адаптированной математической моделью взаимодействия ВПА ЭЛАНГ-4 с геосредой. В связи с этим, принимаем значения величин, не подвергшихся изменениям при адаптации модели, равными аналогичным величиннам, принятым для ВПА ЭЛАНГ-4 [4–7,11,13,14,37]. Значения величин, связанных с параметрами исполнительного органа главного забоя и исполнительных органов законтурных элементов принимаем в соответствии с рекомендациями, изложенными в работах Ананьева К.А. и Ермакова А.Н. [35,36]. Значения величин массогабаритных параметров УСС приняты условно, соразмерно предполагаемым габаритам узла.

Сила тяжести отбитой горной массы в головной секции равна [4]:

$$G_{OFM} = n_{\pi} \cdot K_{3} \cdot \gamma_{\Pi OP} \cdot b_{\pi} \cdot h_{\Pi \pi} \cdot m, \qquad (3.38)$$

где *n*<sub>Л</sub> – количество заполненных лопаток погрузочного органа, шт;

К<sub>3</sub> – коэффициент заполнения лопатки погрузочного органа;

 $\gamma_{\Pi OP}$  – удельный вес пород, Н/м<sup>3</sup>;

*b*<sub>Л</sub> – длина погрузочной лопатки, м;

 $h_{\Pi\Pi}$  – высота погрузочной лопатки, м;

*m* – среднее расстояние между лопатками, м.

Вращающий момент, необходимый для перемещения разрушенной породы из нижней части геохода вверх равен [4]:

$$M_{\Gamma M} = K_3 \cdot \gamma_{\Pi OP} \cdot b_{\pi} \cdot h_{\Pi \pi} \cdot m \cdot (d_1 + d_2 + 2 \cdot d_3), \qquad (3.39)$$

где  $d_1, d_2, d_3$  – расстояния от центральной вертикальной оси до линии действия веса горной массы в лопатке, м.

Суммарные силы трения на корпусах секций геохода определены в работе [4]. Выражения для определения суммарных сил трения на вращающейся и не вращающейся частях корпуса геохода принимают вид:

$$T_{OE}^{BP} = f_{TP} \left[ \frac{K_{OE} \cdot \gamma_{\Pi OP} \cdot \pi \cdot (1+\lambda) \cdot \left[ 1 + 2 \cdot tg \left( 45^{\circ} - \frac{\rho}{2} \right) \right] \cdot r_{\Gamma}^{2} \cdot \left[ l_{BP} + \frac{r_{\Gamma}}{a_{1}} \cdot \left( e^{-a_{1} \frac{l_{BP}}{r_{\Gamma}}} - 1 \right) \right]}{f} + \right] (3.40)$$

$$T_{OE}^{HBP} = f_{TP} \left[ \frac{K_{OE} \cdot \gamma_{\Pi OP} \cdot \pi \cdot (1+\lambda) \cdot \left[ 1 + 2 \cdot tg \left( 45^{\circ} - \frac{\rho}{2} \right) \right] \cdot r_{\Gamma}^{2} \cdot \left[ l_{HBP} + \frac{r_{\Gamma}}{a_{1}} \cdot \left( e^{-a_{1} \frac{l_{a}}{r_{\Gamma}}} - e^{-a_{1} \frac{l_{BP}}{r_{\Gamma}}} \right) \right]}{f} + G_{HBP} \cdot \cos \alpha \right] + \left[ (3.41) \right]$$

где *К*<sub>*OF*</sub> – общий коэффициент нагрузки погрузочного органа;

λ – коэффициент бокового давления породы;

*ρ* – угол внутреннего трения породы, град;

*а*<sub>1</sub> – постоянный эмпирический коэффициент.

Общий коэффициент нагрузки погрузочного органа определяется по формуле [4]:

$$K_{OF} = n_{\pi} \cdot K_{H} \cdot m_{e} \cdot K_{P}, \qquad (3.42)$$

где *К<sub>H</sub>* – коэффициент, учитывающий назначение выработки;

*m*<sub>*в*</sub> – коэффициент, учитывающий влияние способа проходки выработки;

*К*<sub>*P*</sub> – коэффициент условий работы породного массива.
В таблице 3.2 приведены все принятые значения величин для дальнейших расчетов.

Таблица 3.2 – Принятые	значения величин,	входящих в	выражения	(3.1-3.42)

Обозначение величины	Наименование, единицы измерения			
Конструктивные величины				
$m_{\Gamma}$	суммарная масса головной секции геохода и смонтированного на ней оборудования, кг	4000		
m <sub>cm</sub>	суммарная масса стабилизирующей секции геохода и смонтированного на ней оборудования, кг	2800		
$m_{\scriptscriptstyle OE}^{\scriptscriptstyle VCC}$	масса оболочки УСС, кг	500		
$m_{\scriptscriptstyle BH}^{\scriptscriptstyle VCC}$	масса внутреннего кольца УСС, кг	500		
$h_{_{e}}$	шаг винтовой линии, вдоль которой располагаются внешние движители геохода, м	0,307		
$h_{\scriptscriptstyle B\!arDelta}$	высота внешнего движителя геохода, м	0,245		
h <sub>эп</sub>	высота элемента противовращения геохода, м	0,3		
β	угол подъема винтовой линии, вдоль которой располагается внешний движитель геохода, град	3		
n <sub>n</sub>	количество заполненных лопаток, шт	4		
$b_{_{\scriptscriptstyle A}}$	длина погрузочной лопатки, м	0,7		
$h_{n\pi}$	высота погрузочной лопатки, м	0,35		
т	среднее расстояние между лопатками, м	0,7		
$d_1$		0,32		
$d_{2}$	расстояния от центральной вертикальной оси до линии действия веса горной массы в лопатке, м			
$d_{3}$		1,3		
$r_{\Gamma}=r_{X}$	радиусы головной и хвостовой секций (по оболочке), м	1,85		
$R_{1}$	радиус выработки, м	1,85		

Продолжение таблицы 3.2

Обозначение величины	Наименование, единицы измерения	Значение		
$l_{\Gamma C}$	длина головной секции, м	2,33		
$l_{_{YCC}}$	длина УСС, м	0,5		
l <sub>CT</sub>	длина стабилизирующей секции, м	1,12		
$l_{_{\Gamma}}$	общая длина геохода, м	3,95		
Величины, свя	Величины, связанные с параметрами исполнительного органа главного забоя и исполнительных орга- нов законтурных элементов			
R <sub>o</sub>	проекция результирующей силы на ось вращения геохода от работы ис- полнительного органа главного забоя (при встречном фрезеровании), Н	2,914·10 <sup>5</sup>		
М <sub>ИО</sub>	вращающий момент сопротивления резанию на исполнительном органе главного забоя (при встречном фрезеровании), Нм	2,474·10 <sup>5</sup>		
R <sub>иовдн</sub>	суммарная нормальных составляющих усилий внедрения исполнитель- ных органов внешних движителей в приконтурный массив при движении агрегата, Н	2,327·10 <sup>4</sup>		
R <sub>иоэпн</sub>	суммарная нормальных составляющих усилий внедрения исполнитель- ных органов элементов противовращения в приконтурный массив при движении агрегата, Н	5,505·10 <sup>4</sup>		
М <sub>ИОВД</sub>	вращающий момент сопротивления резанию на исполнительных органах внешних движителей, Нм	5,614·10 <sup>4</sup>		
М <sub>иоэп</sub>	вращающий момент сопротивления резанию на исполнительных органах элементов противовращения, Н·м	1,082·10 <sup>5</sup>		
Величины, связанные с параметрами геосреды и режимами работы геохода				
$\gamma_{\Pi OP}$	удельный вес пород, Н/м <sup>3</sup>	22000		
ρ	угол внутреннего трения породы, град	31,383		
P <sub>0</sub>	сила сопротивления геосреды упругопластическому сжатию, Н/м	11·10 <sup>3</sup>		
P <sub>ycn</sub>	силовой параметр, характеризующий сопротивление геосреды упруго- пластическому сжатию, Н/м	61,9·10 <sup>3</sup>		

Продолжение таблицы 3.2

Обозначение величины	Наименование, единицы измерения	Значение
$h_{_{ycn}}$	линейный параметр, характеризующий сопротивление геосреды упруго- пластическому сжатию, Н/м	0,639
$f_{\it mp}$	коэффициент трения стали по породе в условиях сухого трения	0,61
φ	коэффициент, учитывающий влияние угла резания	0,59
$f_{mp1}$	коэффициент трения скольжения стали по стали в условиях сухого трения	0,15
f	коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова	1
λ	коэффициент бокового давления породы	0,333
$a_1$	постоянный эмпирический коэффициент	0,3
$n_n$	коэффициент перегрузки погрузочного органа	0,7
К,,	коэффициент, учитывающий назначение выработки	1,2
m <sub>e</sub>	коэффициент, учитывающий влияние способа проходки выработки	1,1
<i>K</i> <sub><i>P</i></sub>	коэффициент условий работы породного массива	1,3
<i>K</i> <sub>3</sub>	коэффициент заполнения лопатки погрузочного органа	0,4

Выражения (3.1-3.42) являются математической моделью взаимодействия геохода с геосредой. Математическая модель позволяет определять усилия, действующие на геоход во время его перемещения при различных вариантах компоновочных схем УСС.

Достоверность адаптированной математической модели обусловлена применением экспериментально проверенной исходной модели и гарантируется использованием фундаментальных положений механики.

75

3.4 Влияние положения границы вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода на значения усилий, действующих на геоход во время его перемещения

Математическая модель взаимодействия геохода с геосредой позволяет исследовать влияние различных факторов на усилия, действующие на геоход во время его перемещения.

Как видно из схемы на рисунке 3.1 выбор компоновочной схемы УСС влияет на массогабаритные параметры вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода и, как следствие, на положение границы между ними. Также на положение данной границы влияет длина оболочки УСС. В связи с разницей характера взаимодействия вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода с окружающей горной породой выработки положение границы между ними несет значительное влияние на распределение усилий взаимодействия геохода с геосредой.

Для определения влияния положения границы вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода на требуемый вращающий момент трансмиссии, силу взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода и реакцию геосреды на внешний движитель ( $M_{BP}$ ,  $F_{B3}$ ,  $R_{BД}$ ) были построены графики зависимостей по выражениям (3.31, 3.35, 3.37) (рисунки 3.3-3.5). На графиках для определения положения границы вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода используется отношение длины вращающейся части корпуса  $l_{BP}$  к общей длине геохода  $l_{\Gamma}$ .



Рисунок 3.3 – Зависимость требуемого вращающего момента трансмиссии от положения границы вращающейся и не вращающейся частей корпуса

```
геохода
```



Рисунок 3.4 – Зависимость силы взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода от положения границы между ними





В результате анализа зависимостей установлено, что при увеличении доли вращающейся части корпуса геохода от его общей длины от 0,05 до 0,95 происходит:

 монотонное увеличение требуемого вращательного момента трансмиссии на 17%;

 монотонное уменьшение силы взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода на 39%;

 монотонное уменьшение реакции геосреды на внешний движитель геохода на 26%.

3.5 Влияние выбора компоновочной схемы узла сопряжения секций геохода на значения усилий, действующих на геоход во время его перемещения

Рассмотрим влияние выбора компоновочной схемы УСС на требуемый вращающий момент трансмиссии, силу взаимодействия между вращающейся и не

вращающейся частями корпуса геохода и суммарную реакцию пород контура выработки на внешний движитель (*М*<sub>ВР.</sub> *F*<sub>ВЗ</sub>, *R*<sub>ВД</sub>). Математическая модель позволяет рассмотреть данное влияние при различных габаритах геохода и углах наклона проводимой горной выработки. Диапазон изменения диаметра геохода  $D_{\Gamma}$  примем согласно типоразмерному ряду проходческих щитов, разработанному в ЦНИИ-Подземмаш (от 2,1 м до 5,6 м). Угол наклона проводимой выработки α оказывает значительное влияние на картину нагружения. При движении вверх под углами наклона выработки более 30°, нагрузки от горного давления перераспределятся с корпуса на исполнительный орган геохода. При движении вниз под углами наклона более 30°, нагрузки от горного давления будут действовать только на корпус геохода и крепь за ним [6,7,70]. При этом, согласно требованиям предъявленным в техническом задании на изготовление опытного образца геохода, угол наклона проводимых выработок должен варьироваться в пределах ±25°. В связи с этим, введем ограничения ПО углам наклона проводимой выработки от -25° до 25°.

На рисунках 3.6-3.8 представлены зависимости  $M_{BP}$ ,  $F_{B3}$  и  $R_{BJ}$  от диаметра геохода при различных компоновочных схемах УСС и углах наклона выработки.

При построении графиков были приняты допущения [6,7]:

– силы инерции оборудования в головной секции геохода настолько малы,
 что их можно не учитывать;

— усилия от транспортно-погрузочной системы на корпус геохода изменяются по одинаковым законам при любых углах наклона проводимой выработки;

 величина горного давления одинакова при любых углах наклона проводимой выработки.

Из анализа графиков зависимостей (рисунки 3.6-3.8) можно сделать вывод – при диаметрах геохода от 2,1 до 5,6 метра и углах наклона проводимой выработки от -25° до 25°, при компоновочной схеме с сопряжением оболочки УСС с головной секцией геохода, требуемый вращательный момент трансмиссии  $M_{BP}$  больше на величину от 2% до 4%, сила взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода  $F_{B3}$  меньше на величину от 5% до 7% и реакция геосреды на внешний движитель геохода  $R_{BJ}$  меньше на величину от 3% до 5%, чем при компоновочной схеме с сопряжением оболочки УСС со стабилизирующей секцией геохода.



Рисунок 3.6 – Зависимость требуемого вращающего момента трансмиссии от диаметра геохода при различных компоновочных схемах УСС и углах наклона выработки



Рисунок 3.7 – Зависимость силы взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса от диаметра геохода при различных компоновочных схемах УСС и углах наклона выработки



Рисунок 3.8 – Зависимость реакции геосреды на внешний движитель от диаметра геохода при различных компоновочных схемах УСС и углах наклона выработки

#### 3.6 Выводы

1. Разработана схема влияния компоновочного решения УСС на массогабаритные параметры вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода.

2. Произведена адаптация математической модели взаимодействия геохода с геосредой. Адаптированная математическая модель учитывает особенности конструкции разрабатываемого опытного образца геохода. При этом модель позволяет определять усилия, действующие на геоход во время его перемещения, при всех рассматриваемых вариантах компоновочных схем УСС.

3. При увеличении доли вращающейся части корпуса геохода от его общей длины от 0,05 до 0,95 происходит:

 монотонное увеличение требуемого вращательного момента трансмиссии на 17%;

 монотонное уменьшение силы взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода на 39%;

 монотонное уменьшение реакции геосреды на внешний движитель геохода на 26%.

4. При диаметрах геохода от 2,1 до 5,6 метра и углах наклона проводимой выработки от -25° до 25°, при компоновочной схеме с сопряжением оболочки УСС с головной секцией геохода, требуемый вращательный момент трансмиссии  $M_{BP}$  больше на величину от 2% до 4%, сила взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода  $F_{B3}$  меньше на величину от 5% до 7% и реакция геосреды на внешний движитель геохода  $R_{BД}$  меньше на величину от 3% до 5%, чем при компоновочной схеме с сопряжением оболочки УСС со стабилизирующей секцией геохода.

На основе представленных выводов сформулировано следующее научное положение:

– при увеличении длины вращающейся части корпуса при неизменной общей длине геохода, требуемый вращающий момент трансмиссии монотонно увеличивается, а сила взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса и сила реакции геосреды на внешний движитель геохода монотонно уменьшаются.

## 4 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ СЕКЦИЙ ГЕОХОДА

Одним из основных требований, предъявляемых к УСС геохода, является обеспечение достаточной прочности конструкции геохода. Как отмечалось во второй главе, влияние выбора компоновочной схемы УСС геохода на напряженнодеформированное состояние (НДС) его элементов неизвестно и требует дальнейшего исследования. Влияние геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия на НДС его элементов также неизвестно. В связи с чем, назрела необходимость в проведении сравнительного анализа НДС элементов УСС геохода при различных вариантах его компоновочных схем и геометрических параметрах элементов для передачи тягового усилия.

# 4.1 Влияние компоновочной схемы узла сопряжения секций геохода на напряженно-деформированное состояние его элементов

4.1.1Разработка электронной геометрической модели узла сопряжения секций геохода

Для проведения сравнительного анализа НДС элементов УСС геохода необходимо создать электронную геометрическую модель (далее электронную модель) узла. На этапе сравнительного анализа, неизвестна конечная конструкция УСС геохода. Известны только варианты его компоновки, диаметр геохода, и тип применяемой трансмиссии.

Таким образом, на данном этапе, возможно точно определить только те геометрические параметры УСС, что связаны с диаметром геохода, и типом применяемой трансмиссии. Иные параметры принимаются произвольно, но соразмерно габаритам разрабатываемой модели.

Рассмотрим схемы определения габаритных параметров для создания электронной модели УСС геохода при различных вариантах его компоновки (ри-

сунок 4.1). От габаритов выбранной трансмиссии и диаметра геохода зависят такие геометрические параметры как диаметр оболочки УСС (равен диаметру геохода  $D_{\Gamma}$ ), радиус габарита внутреннего пространства  $R_{\Gamma A E}$  и ширина трансмиссии  $h_{TP}$ .



·——Головная секция — Стабилизирующая секция — -

1 – оболочка УСС; 2 – внутреннее кольцо УСС; 3 – элементы для передачи вращающего момента трансмиссии; 4 – элементы для передачи тягового усилия; 5,6 – фланцы для крепления УСС к секциям геохода.
а) при компоновочной схеме 1; б) при компоновочной схеме 2;

в) при компоновочной схеме 3; г) при компоновочной схеме 4.

Рисунок 4.1 – Схемы определения габаритных параметров для создания

электронной геометрической модели УСС

Как отмечалось ранее, за базовую конструкцию при разработке конструктивных решений УСС была принята трансмиссия геохода на основе гидроцилиндров, расположенных в два ряда и работающих в противофазе. Радиус габарита внутреннего пространства при трансмиссии с гидроприводом определяется по формуле [6]:

$$R_{\Gamma A \mathcal{B}} = \frac{D_{V C T. \mathcal{U} T}}{2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\left(\frac{D_{V C T. \mathcal{U} T}}{2}\right)^2 + L_p^2 - \left(\frac{D_{V C T. \Gamma \mathcal{U}}}{2}\right)^2}{D_{V C T. \mathcal{U} T} \cdot L_p}\right)^2} - (0, 75...1) D_{\Pi}, \qquad (4.1)$$

где *D*<sub>*VCT.ШТ*</sub> – диаметр окружности вращения цапфы (установки цапфы) штока гидроцилиндров, м;

86

*D<sub>VCT.ГЦ</sub>* – диаметр окружности установки цапф корпусов гидроцилиндров,
 м;

 $L_P$  – максимальное расстояние между опорами гидроцилиндра, м;

 $D_{\Pi}$  – диаметр поршня гидроцилиндров, м.

Согласно рекомендациям [6] размеры диаметра окружности установки цапф корпусов гидроцилиндров на обечайке хвостовой секции  $D_{YCT,\Gamma II}$ , и диаметра окружности вращения цапфы (установки цапфы) штока на головной секции  $D_{YCT,IIIT}$ , определяются по выражениям:

$$D_{_{VCT,\Gamma II}} = D_{_{\Gamma}} - (3...4)D_{_{\Pi}}$$
(4.2)

$$D_{_{VCT,IIIT}} = D_{_{\Gamma}} - (2...3)D_{_{\Pi}}$$
(4.3)

Максимальное расстояние между опорами гидроцилиндра  $L_P$  определяется в зависимости от количества гидроцилиндров  $n_{\Gamma II}$  и диаметров поршня  $D_{II}$  [6]:

$$L_{P} = D_{yCT,\Gamma U} \cdot \sin\left(\frac{180^{\circ}}{n_{\Gamma U}} - \arcsin\frac{D_{\Pi}}{D_{yCT,\Gamma U}}\right)$$
(4.4)

Полученное значение не должно превышать значение максимального расстояния между опорами гидроцилиндра, проверенного по условию продольной устойчивости сжимаемого штока *L*<sub>*Pmax*</sub> [71]:

$$L_{P_{\max}} = \frac{356.8 \cdot d_{IIIT}^2}{D_{II} \cdot k_3 \sqrt{p \cdot [n]}},$$
(4.5)

где  $d_{IIIT}$  – диаметр штока гидроцилиндра, м;

 $k_{_3}$  – коэффициент закрепления, для шарнирного закрепления обоих концов гидроцилиндра  $k_{_3}$ =1;

[*n*] – коэффициент запаса (обычно [*n*] = 3,5...4);

р – рабочее давление в гидроцилиндре, МПа.

Тип гидроцилиндров и их количество определяются исходя из требуемого вращающего момента трансмиссии, определенного по выражению (3.31) математической модели взаимодействия геохода с геосредой для заданного диаметра геохода. Диаметры поршня и штоков гидроцилиндров, а также их номинальное давление выбираются по стандартным рядам ГОСТ 6540-68.

Исходя из требуемого вращательного момента трансмиссии геохода диаметром 3,2 м ( $M_{BP} = 1,79 \cdot \text{MH} \cdot \text{м}$ ), были определены необходимые параметры гидроцилиндров трансмиссии (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Параметры гидроцилиндров трансмиссии геохода диаметром 3,2 м, необходимые для определения радиуса габарита внутреннего пространства

Количество гидро-	Диаметр поршня	Диаметр штока гид-	Номинальное
цилиндров, шт	гидроцилиндров, м	роцилиндров, м	давление,
			МΠа
16	0,09	0,056	20

Произведя расчеты по выражениям (4.1 – 4.5) было получено значение радиуса габарита внутреннего пространства для геохода диаметром 3,2 м –  $R_{\Gamma A E} = 1,2$  м. Исходя из выбранного диаметра гидроцилиндров трансмиссии, а также с учетом зазоров между ними ширина трансмиссии для геохода диаметром 3,2 м составит приблизительно 250 мм.

Для исследования НДС элементов УСС трансмиссия в электронной модели была заменена усилиями, приходящимися на оболочку и внутреннее кольцо узла, со стороны гидроцилиндров трансмиссии. При этом необходимо определить количество точек приложения данных усилий. Согласно принятой схеме работы трансмиссии, половина гидроцилиндров всегда находится в фазе выдвижения, а вторая половина в фазе складывания (рисунок 2.3). Таким образом, при работе геохода, одновременно со стороны трансмиссии к оболочке и внутреннему кольцу УСС будет прикладываться равномерно распределенная по окружности геохода нагрузка от половины из выбранного количества гидроцилиндров (от 8 штук при диаметре геохода 3,2 м).

На внутреннем кольце электронной модели УСС необходимо выполнить шарниры с точками крепления корпусов гидроцилиндров на расстоянии равном  $D_{YCT.\Gamma \downarrow I} / 2$  от оси симметрии кольца. На оболочке УСС выполняются два венца с пазами для упора штоков гидроцилиндров. Пазы выполняются на расстоянии равном  $D_{YCT.IIIT} / 2$  от оси симметрии оболочки УСС.

Такие параметры как толщина стенок оболочек секций  $b_1$  и  $b_2$ , суммарная толщина элементов для передачи тягового усилия  $h_{\Pi T}$  и толщина фланцев сопряжения УСС с секциями геохода  $h_{\phi 1}$  и  $h_{\phi 2}$  (рисунок 4.1) принимаются произвольно, но соразмерно габаритам разрабатываемой модели. При этом в ходе проведения численного эксперимента, расчетные напряжения в элементах модели не должны выходить за область упругих деформаций выбранного материала, т.к. это может привести к получению некорректных результатов. В этом случае значения указанных параметров должны быть пересмотрены в сторону их увеличения до тех пор, пока расчетные напряжения в элементах модели не примем значения указанных выше параметров равными:  $b_1 = b_2 = 20$ мм,  $h_{\Pi T} = 80$ мм,  $h_{\phi 1} = h_{\phi 2} = 40$ мм.

Длина УСС принимается исходя из конструктивных соображений. Она должна быть минимальной, но достаточной для размещения внутри УСС трансмиссии и элементов для передачи тягового усилия. Исходя из принятых значений толщины фланцев сопряжения УСС с секциями геохода, суммарной толщины элементов для передачи тягового усилия и ширины трансмиссии, а также с учетом зазоров между указанными элементами длина УСС была принята –  $l_{VCC}$  = 700 мм.

Исходя из определенных габаритных параметров, в среде SolidWorks 2013 были выполнены электронные модели УСС геохода для различных вариантов компоновочных схем (рисунок 4.2). При анализе рассматриваемых компоновочных схемах УСС 1 и 4

(рисунок 4.1а, г) и при компоновочных схемах 2 и 3 (рисунок 4.16, в) соответственно конструкция самого УСС идентична, меняется лишь его пространственное положение при сборке с секциями геохода. Таким образом, было разработано две электронные геометрические модели УСС. Для компоновочных схем УСС 1 и 4 электронная модель представлена на рисунке 4.2а). Для компоновочных схем УСС 2 и 3 электронная модель представлена на рисунке 4.2б).



 оболочка УСС; 2 – внутреннее кольцо УСС; 3 – венцы зацепления штоков гидроцилиндров трансмиссии; 4 – элемент передачи тягового усилия на оболочке УСС; 5 – кронштейны крепления корпусов гидроцилиндров трансмиссии; 6 – элемент передачи тягового усилия на внутреннем кольце УСС.
 а) электронная геометрическая модель УСС для компоновочных схем 1 и 4;
 б) электронная геометрическая модель УСС для компоновочных схем 2 и 3 Рисунок 4.2 – Электронные геометрические модели УСС

В качестве материала изделия выбрана сталь 09Г2С [72]. Сталь конструкционная низколегированная, применяется для элементов сварных металлоконструкций. Основные свойства выбранного материала приведены в таблице 4.2.

При изменении диаметра геохода параметры трансмиссии изменяются практически пропорционально [6]. Соответственно, и габаритные параметры

УСС, при изменении диаметра геохода, будут также изменяться пропорционально.

Таблица 4.2 –	Свойства стали	09Г2С п	ри T = 2	20°C.
		• /		

Наименование свойства	Единица	Значение
	измере-	
	ния	
Временное сопротивление разрыву, $[\sigma_B]$	МΠа	470
Предел текучести, [σ <sub>т</sub> ]	МΠа	325

4.1.2Разработка расчетной модели для проведения анализа напряженно-деформированного состояния элементов узла сопряжения секций геохода в зависимости от выбранного компоновочного решения

Для исследования напряженно-деформированного состояния элементов УСС в зависимости от выбранного компоновочного решения была составлена расчетная модель. На электронной геометрической модели были назначены кинематические (крепления) и статические (нагрузки) граничные условия.

УСС сопрягается с головной и стабилизирующей секциями геохода. Для составления корректной картины нагружения электронная модель УСС была дополнена оболочками, имитирующими головную и стабилизирующую секции геохода. Данные оболочки выполнены с фланцами крепления секций к оболочке и внутреннему кольцу УСС (рисунок 4.3). Кинематические граничные условия должны прилагаться к внешним движителям и элементам противовращения геохода. В целях упрощения расчетной модели и ускорения расчетов, на оболочках, имитирующих секции геохода, вместо внешних движителей и элементов противовращения были выполнены кольца 5, 6 к которым и были приложены кинематические граничные условия.

Кольцо 5 (рисунок 4.3) имитирует элементы противовращения на стабилизирующей секции геохода. В качестве кинематического граничного условия к нему было применено ограничение «Зафиксированная геометрия» (рисунок 4.4). Это крепление ограничивает линейные перемещения по трем координатным осям, принимая их равными нулю.



1 – головная секция; 2 – стабилизирующая секция; 3 оболочка УСС; 4 – внутреннее кольцо УСС; 5,6 – кольца на секциях для приложения кинематических граничных условий.

Рисунок 4.3 – Электронная геометрическая модель УСС в сборе с

оболочками, имитирующими секции геохода

Кольцо 6 (рисунок 4.3) имитирует внешние движители на головной секции геохода. В качестве кинематического граничного условия к нему было применено ограничение «На цилиндрических гранях» (рисунок 4.4). Это крепление позволяет самостоятельно выбрать налагаемые на цилиндрическую поверхность ограничения. Для корректного отражения картины нагружения на головную секцию наложены ограничения по вращению вокруг ее оси, а также ограничения радиальных перемещений секции. Таким образом, головная секция имеет возможность только линейного перемещения вдоль оси вращения геохода.

К статическим граничным условиям модели относятся нагрузки, прилагаемые к элементам УСС от гидроцилиндров трансмиссии, нагрузки, возникающие на элементах для передачи тягового усилия, под действием силы взаимодействия секций; а также нагрузки, образованные под действием силы горного давления.



Рисунок 4.4 – Кинематические (крепления) граничные условия, приложенные к исследуемой геометрической модели

Для приложения усилий от гидроцилиндров трансмиссии необходимо определить их величину и направление приложения. На схеме (рисунок 4.5) представлено два положения гидроцилиндра трансмиссии: первое – в начале хода, в сложенном состоянии; второе – в конце хода, в разложенном состоянии. На схеме видно, что по мере выдвижения штока, линия, вдоль которой прикладывается усилие гидроцилиндра, стремится к касательному положению относительно цилиндрических поверхностей оболочки и внутреннего кольца УСС. Таким образом, оболочка и внутреннее кольцо УСС будут более нагружены в начале хода гидроцилиндров трансмиссии.

Для определения направления приложения усилий от гидроцилиндров необходимо определить центральный угол между опорами гидроцилиндра в начальном положении выдвижения штока  $\gamma_0$ .



1 – положение гидроцилиндра трансмиссии в сложенном состоянии (начало хода);
 2 – положение гидроцилиндра трансмиссии в разложенном состоянии (конец хода)
 Рисунок 4.5 – Схема для определения угла между опорами гидроцилиндров

трансмиссии геохода [6]

Центральный угол между опорами гидроцилиндра в начальном положении выдвижения штока определяется по выражению[6]:

$$\gamma_{0} = \arccos \frac{\frac{D_{yCT.\Gamma U}^{2} + D_{yCT.IUT}^{2}}{2} - 2L_{0}^{2}}{D_{yCT.\Gamma U} \cdot D_{yCT.IUT}},$$
(4.6)

где  $L_0$  – расстояние между цапфами корпуса и штока гидроцилиндра в сложенном состоянии (при минимальной раздвижности), м.

Значение расстояния между цапфами корпуса и штока гидроцилиндра в сложенном состоянии определяется по выражению [6]:

$$L_0 = \frac{L_P}{1 + (0,3 \div 0,8)} \tag{4.7}$$

Для геохода диаметром 3,2 м центральный угол между опорами гидроцилиндра в начальном положении выдвижения штока равен 24,5°. Значение силы взаимодействия секций геохода определяется по выражению (3.35). Для геохода диаметром 3,2 м при сопряжении оболочки УСС с головной секцией (компоновочные схемы УСС 1 и 2) сила взаимодействия равна 1,08 МН. При сопряжении с головной секцией внутреннего кольца УСС (схемы 3 и 4), сила взаимодействия секций равна 1,144 МН.

В разрабатываемой расчетной модели не учитывается влияние сил тяжести конструкции, а также сил трения оболочек секций и УСС о породу, следовательно, для упрощения расчетов, можно пренебречь силами горного давления, а силу взаимодействия секций можно приложить к торцу головной секции по направлению движения геохода (рисунок 4.6). Назначенные статические граничные условия позволяют поступательно перемещаться головной секции относительно оси вращения геохода. Следовательно, при перемещении головной секции под действием приложенной нагрузки, сила взаимодействия секций будет прилагаться и к элементам передачи тягового усилия УСС.

Значение усилия, развиваемого одним гидроцилиндром трансмиссии, для достижения требуемого вращательного момента трансмиссии определяется по выражению:

$$F_{\Gamma II} = \frac{M_{BP}}{h_{\Gamma II} \cdot n_{\Gamma II}}, \qquad (4.8)$$

где  $h_{\Gamma U}$  – плечо приложения силы гидроцилиндра, м.

Плечо приложения силы гидроцилиндра трансмиссии геохода при минимальной раздвижности определяется по выражению [6]:

$$h_{\Gamma \mathcal{U}} = \frac{D_{_{VCT, \mathcal{U}T}}}{2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\left(\frac{D_{_{VCT, \mathcal{U}T}}}{2}\right)^2 + L_0^2 - \left(\frac{D_{_{VCT, \Gamma \mathcal{U}}}}{2}\right)^2}{D_{_{VCT, \mathcal{U}T}} \cdot L_0}\right)^2}\right)^2}$$
(4.9)

Тогда усилие, развиваемое одним гидроцилиндром, для достижения требуемого вращательного момента трансмиссии геохода диаметром 3,2 м равно  $9,53 \cdot 10^4$  H для компоновочных схем УСС 1 и 2, и  $1,01 \cdot 10^5$  H для компоновочных схем 3 и 4. Все назначенные к элементам электронной модели УСС статические и кинематические граничные условия представлены на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Схема нагружения модели УСС (элементы модели разнесены)

При исследовании напряженно-деформированного состояния сборочных единиц необходимо задать условия контактного взаимодействия соприкасающихся поверхностей деталей. В ходе проведенного численного эксперимента для соприкасающихся поверхностей элементов для передачи тягового усилия было использовано контактное условие «Нет проникновения», что исключает возможность возникновения интерференции компонентов. Для поверхностей фланцев сопряжения секций геохода с оболочкой и внутренним кольцом УСС использовано контактное условие «Связанные», что исключает наличие зазоров между соприкасающимися элементами, при этом выбранные детали ведут себя как элемент выполненный заедино [73,74].

#### **4.1.3Обоснование размера конечных элементов при дискретизации** электронной модели узла сопряжения секций геохода

Для сведения погрешности расчета к минимуму было проведено обоснование размеров конечных элементов (КЭ) при дискретизации модели. Было построено несколько вариантов сетки на геометрической модели УСС. В нагруженную поверхность должно быть помещено целое число элементов. Таким образом, размер конечного элемента должен быть кратным ширине тягового кольца  $H_{K.TЯГ.}$ . Было рассмотрено несколько вариантов сетки, с различными размерами КЭ (рисунок 4.7).



а) количество КЭ, размещенных по ширине тягового кольца–1, размер конечного элемента – 340 мм; б) количество КЭ, размещенных по ширине тягового кольца –2, размер конечного элемента – 170 мм; в) количество КЭ, размещенных по ширине тягового кольца –4, размер конечного элемента – 85 мм; г) количество КЭ, размещенных по ширине кольца для передачи тягового усилия –5, размер конечного элемента – 68 мм.

Рисунок 4.7 – Дискретизация геометрической модели УСС сеткой

#### конечных элементов

Были получены графики влияния количества конечных элементов, размещенных по ширине тягового кольца, на напряжения по Мизесу σ<sub>M</sub> и эквивалентные перемещения μ (рисунок 4.8).

Как видно из графиков, при количестве конечных элементов, размещенных по ширине тягового кольца, от двух и более результаты моделирования мало зависят от плотности сетки. Данная зависимость наблюдается и при других диаметрах геохода и ширине тягового кольца (на графиках приведены зависимости при  $D_{\Gamma} = 3,2$  м,  $H_{K,THT} = 340$  мм).



Рисунок 4.8 – Изменение результатов моделирования в зависимости от размера конечных элементов ( $D_{\Gamma}$  = 3,2 м,  $H_{K,TSR\Gamma}$  = 340 мм)

Таким образом, при дальнейших исследованиях НДС элементов УСС, была принята плотность сетки, при которой  $H_{K.TЯГ.}/\Delta=2$ . При диаметре геохода 3,2 м и ширине тягового кольца 340 мм, был принят максимальный размер конечного элемента сетки равным 170 мм. Была использована сетка с параболическими КЭ в форме тетраэдров. При создании сетки КЭ в качестве управляющего использовался параметр «Сетка на основе кривизны», что позволяет в автоматическом режиме создавать большее количество элементов в областях с более высокой кривизной поверхности модели [73].

### 4.1.4Оценка влияния компоновочной схемы узла сопряжения секций геохода на напряженно-деформированное состояние его элементов

При расчете использовался алгоритм «FFEPlus», который позволяет ускорить процесс расчета при задачах с большой размерностью за счет усовершенствованного переупорядочения матрицы без потери точности расчета [73].

В результате расчета методом конечных элементов были получены эпюры распределения эквивалентных напряжений в элементах УСС под действием заданных ранее нагрузок (рисунок 4.9-4.12). Расчеты производились для различных вариантов компоновочных схем УСС. На рисунке 4.9 представлена эпюра распределения эквивалентных напряжений в элементах УСС при компоновочной схеме узла №1, когда оболочка УСС сопряжена с головной секцией геохода, а со стороны забоя сначала располагается трансмиссия, а затем элементы для передачи тягового усилия. Эпюра распределения эквивалентных напряжений в элементах УСС при компоновочной схеме узла №2, когда оболочка УСС сопряжена с головной секцией геохода, а со стороны забоя сначала располагаются элементы для передачи тягового усилия, а затем трансмиссия представлена на рисунке 4.10. На рисунке 4.11 представлена эпюра распределения эквивалентных напряжений в элементах УСС при компоновочной схеме узла №3, когда оболочка УСС сопряжена со стабилизирующей секцией геохода, а со стороны забоя сначала располагается трансмиссия, а затем элементы для передачи тягового усилия. На рисунке 4.12 представлена эпюра распределения эквивалентных напряжений в элементах УСС при компоновочной схеме узла №4, когда оболочка УСС сопряжена со стабилизирующей секцией геохода, а со стороны забоя сначала располагаются элементы для передачи тягового усилия, а затем трансмиссия.

В числе основных требований к конструкции УСС есть обеспечение достаточного внутреннего пространства для транспортировки отбитой горной породы и доступа к призабойной части выработки, а также обладание радиальными габаритами, не превышающими диаметр оболочек секций геохода. В связи с этим возникает необходимость в исследовании влияния выбора компоновочной схемы УСС на максимальные перемещения в оболочке и внутреннем кольце узла в радиальном направлении (от оси вращения головной секции геохода в сторону контура проводимой выработки). Эпюры распределения эквивалентных радиальных перемещений в элементах УСС представлены на рисунках 4.13–4.16 (для компоновочных схем 1–4 соответственно). Результаты численного сравнительного эксперимента по исследованию НДС элементов УСС в зависимости от выбранной компоновочной схемы узла представлены в таблице 4.3. Максимальные напряжения были определены для каждого элемента УСС геохода в отдельности, а максимальные радиальные перемещения определялись на корпусах оболочки и внутреннего кольца узла.

На основе полученных в ходе численного эксперимента данных были составлены диаграммы влияния выбора компоновочной схемы УСС на максимальные напряжения во всех элементах его конструкции (рисунок 4.17) и на максимальные радиальные эквивалентные перемещения на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС (рисунок 4.18).

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшее значение максимальные эквивалентные напряжения принимают:

 на корпусе оболочки УСС при компоновочной схеме 2, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 9%;

 на корпусе внутреннего кольца УСС при компоновочной схеме 1, наименьшее – при схеме 2. Разница значений составляет 17,5%;

 на фланце крепления оболочки УСС при компоновочной схеме 3, наименьшее – при схеме 4. Разница значений составляет 11%;

 на фланце крепления внутреннего кольца УСС при компоновочной схеме 3, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 43%;

 на элементах для передачи тягового усилия на оболочке УСС при компоновочной схеме 4, наименьшее – при схеме 2. Разница значений составляет 3%;

 на элементах для передачи тягового усилия на внутреннем кольце УСС при компоновочной схеме 3, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 22,5%;

на элементах крепления гидроцилиндров трансмиссии на оболочке
 УСС при компоновочной схеме 2, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 26,5%;

 на элементах упора гидроцилиндров трансмиссии на внутреннего кольца УСС при компоновочной схеме 3, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 22,5%.

Наибольшее значение максимальные радиальные перемещения принимают:

на корпусе оболочки УСС при компоновочной схеме 2, наименьшее – при схеме 4. Разница значений составляет 75%;

 на корпусе внутреннего кольца УСС при компоновочной схеме 4, наименьшее – при схеме 2. Разница значений составляет 33%.

В связи с тем, что в ходе проведенного анализа ни одна из представленных компоновочных схем УСС не продемонстрировала явного преимущества, требуется провести дополнительный анализ для выбора предпочтительного компоновочного решения УСС геохода.



Рисунок 4.9 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений в элементах УСС

при компоновочной схеме УСС №1



Рисунок 4.10 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений в элементах УСС при компоновочной схеме УСС №2



Рисунок 4.11 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений в элементах УСС при компоновочной схеме УСС №3



Рисунок 4.12 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений в элементах УСС при компоновочной



Рисунок 4.13 – Эпюра распределения эквивалентных радиальных перемещений в элементах УСС при компоновочной схеме УСС №1



Рисунок 4.14 – Эпюра распределения эквивалентных радиальных перемещений в элементах УСС при компоновочной схеме УСС №2



Рисунок 4.15 – Эпюра распределения эквивалентных радиальных перемещений в элементах УСС при компоновочной схеме УСС №3



Рисунок 4.16 – Эпюра распределения эквивалентных радиальных перемещений в элементах УСС при компоновочной схеме УСС №4
Таблица 4.3 – Результаты численного сравнительного эксперимента по исследованию НДС элементов УСС в зависимости от выбранной схемы компоновки узла

					Результаты численного эксперимента								
Ма					для оболочки УСС					для внутреннего кольца УСС			
оновочная схе	Принятые значения ве- личин			корпус фланец		элемент для передачи тягового усилия	элементы трансмиссии	корпус		фланец	элемент для передачи тягового усилия	элементы трансмиссии	
Комп	$D_{\Gamma}$ , M	$F_{B3},$ MH	$F_{IU},$ MH	<sub>бм</sub> , М∏а	μ, мм	σ <sub>м</sub> , ΜΠа	σ <sub>м</sub> , Μ∏a	σ <sub>м</sub> , Μ∏а	σ <sub>м</sub> , Μ∏a	µ, MM	<sub>бм</sub> , М∏а	σ <sub>м</sub> , M∏a	σ <sub>м</sub> , ΜΠа
<b>№</b> 1		1.09	0.005	69,464	0,173	41,093	69,464	91,252	133,612	0,373	62,99	60,743	179,872
<b>№</b> 2	2.0	1,08 0,095	76,574	0,635	44,423	67,92	124,034	110,087	0,251	110,087	75,895	139,303	
№ 3	3,2	1 1 4 4	1.144 0.101	75,504	0,626	45,321	68,328	121,921	110,995	0,254	110,995	78,364	137,152
<u>№</u> 4		1,144 0,101 -		70,017	0,159	40,418	70,017	92,716	131,732	0,375	63,408	61,381	182,196



Рисунок 4.17 – Диаграммы влияния выбора компоновочной схемы УСС на максимальные эквивалентные напряжения на элементах его конструкции



Рисунок 4.18 – Диаграммы влияния выбора компоновочной схемы УСС на максимальные радиальные эквивалентные перемещения на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС

4.1.5Выбор компоновочной схемы узла сопряжения секций геохода методом анализа иерархий

Выбор предпочтительной компоновочной схемы узла сопряжения секций геохода был осуществлен при помощи метода анализа иерархий (МАИ). Была построена иерархическая структура (рисунок 4.19), которая содержит цель, критерии сравнения и варианты компоновочных схем УСС геохода.

Критерии сравнения компоновочных схем были сформированы на основе основных требований, предъявляемых к конструкции УСС (таблица 4.4). Таблица 4.4 – Выбор критериев сравнения компоновочных схем УСС

Требования к конструкции УСС.	Критерии сравнения компоновочных схем УСС.
Конструкция УСС должна:	Влияние выбора компоновочной схемы на величину:
<ul> <li>обеспечивать минимальное значе- ние силы воздействия движителя геохода на породу контура выработ- ки за ним;</li> </ul>	<ul> <li>реакции геосреды на внешние движители геохода;</li> <li>силы взаимодействия секций геохода;</li> <li>требуемого вращающего момента трансмиссии геохода;</li> </ul>
<ul> <li>обеспечивать непрерывность перемещения геохода на забой;</li> </ul>	критерий не определен (все компоновоч- ные схемы выполняют требование в рав- ной степени)
-иметь минимальную металлоем- кость;	критерий не определен (все компоновоч- ные схемы выполняют требование в рав- ной степени)
<ul> <li>обеспечивать работу геохода при любых углах наклона проводимой выработки;</li> </ul>	критерий не определен (все компоновоч- ные схемы выполняют требование в рав- ной степени)
<ul> <li>обладать минимальными осевыми габаритами и радиальными габари- тами, не превышающими диаметр оболочек секций геохода;</li> </ul>	<ul> <li>максимальных радиальных эквивалент- ных перемещений в оболочке УСС;</li> </ul>

Требования к конструкции УСС.	Критерии сравнения компоновочных схем УСС.
Конструкция УСС должна:	Влияние выбора компоновочной схемы на величину:
<ul> <li>– быть ремонтопригодной и обеспе- чивать простоту монтажно- демонтажных работ в стесненных условиях горной выработки;</li> </ul>	критерий не определен (все компоновоч- ные схемы выполняют требование в рав- ной степени)
<ul> <li>иметь достаточное внутреннее пространство для транспортировки отбитой горной породы и доступа к призабойной части выработки;</li> </ul>	<ul> <li>максимальных радиальных эквивалент- ных перемещений во внутреннем кольце УСС;</li> </ul>
<ul> <li>обеспечивать достаточную проч- ность конструкции геохода;</li> </ul>	<ul> <li>максимальных напряжений на корпусе оболочки УСС;</li> </ul>
-обеспечивать равнопрочность эле- ментов УСС	<ul> <li>максимальных напряжений на фланце оболочки УСС;</li> </ul>
	<ul> <li>максимальных напряжений на элементе оболочки УСС для передачи тягового усилия;</li> </ul>
	<ul> <li>максимальных напряжений на элемен- тах крепления гидроцилиндров транс- миссии на оболочке УСС;</li> </ul>
	<ul> <li>максимальных напряжений на корпусе внутреннего кольца УСС;</li> </ul>
	<ul> <li>максимальных напряжений на фланце внутреннего кольца УСС;</li> </ul>
	<ul> <li>максимальных напряжений на элементе внутреннего кольца УСС для передачи тягового усилия;</li> </ul>
	<ul> <li>максимальных напряжений на элемен- тах крепления гидроцилиндров транс- миссии на внутреннем кольце УСС.</li> </ul>

Парные сравнения критериев сравнения компоновочных схем УСС геохода приведены в таблице 4.5. Степень предпочтения того или иного критерия определена по фундаментальной шкале оценок МАИ [54].

Далее выполнялись парные сравнения всех вариантов компоновочных схем УСС по каждому критерию сравнения (таблицы 4.6-4.18).

Суммарные итоговые оценки предпочтительности компоновочных схем УСС геохода, полученные методом анализа иерархий представлены в таблице 4.19.

Проведенный анализ показывает, что в наибольшей степени отвечают требованиям к УСС компоновочные схемы, в которых оболочка сопрягается с головной секцией геохода (компоновочные схемы 1 и 2). В основном это обусловлено меньшим влиянием данных схем на рост реакции пород контура выработки на внешние движители геохода. При этом компоновочная схема 1 набрала наибольшую суммарную оценку при анализе МАИ из всех рассмотренных схем.



Рисунок 4.19 – Иерархия задачи о выборе компоновочной схемы УСС геохода

Критерий	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	К8	К9	К10	К11	К12	К13	Bec
101	1	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0			приоритета
KI	1	/	/	9	9	9	9	9	9	9	9	3	5	0,336
К2	1/7	1	1/4	1	1	1	1	1	1	1	1	1/7	1/2	0,031
К3	1/7	4	1	4	4	4	4	4	4	4	4	1/3	1/2	0,102
К4	1/9	1	1/4	1	1	1	1	1	1	1	1	1/7	1/2	0,030
К5	1/9	1	1/4	1	1	1	1	1	1	1	1	1/7	1/2	0,030
К6	1/9	1	1/4	1	1	1	1	1	1	1	1	1/7	1/2	0,030
К7	1/9	1	1/4	1	1	1	1	1	1	1	1	1/7	1/2	0,030
К8	1/9	1	1/4	1	1	1	1	1	1	1	1	1/7	1/2	0,030
К9	1/9	1	1/4	1	1	1	1	1	1	1	1	1/7	1/2	0,030
К10	1/9	1	1/4	1	1	1	1	1	1	1	1	1/7	1/2	0,030
K11	1/9	1	1/4	1	1	1	1	1	1	1	1	1/7	1/2	0,030
K12	1/3	7	3	7	7	7	7	7	7	7	7	1	5	0,219
K13	1/5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1/5	1	0,070
Собственн	Собственное число матрицы сравнений СЗ = 13,284													
Индекс сог	гласовал	нности ]	$\dot{MC} = 0,$	024										
Отношени	е соглас	сованно	сти ОС	= 0,012	2									

Таблица 4.5 – Парные сравнения критериев сравнения компоновочных схем УСС геохода

Компоновочные	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Bec
схемы УСС					приоритета
Схема 1	1	1	5	5	0,417
Схема 2	1	1	5	5	0,417
Схема 3	1/5	1/5	1	1	0,083
Схема 4	1/5	1/5	1	1	0,083

Таблица 4.6 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию К1

Таблица 4.7 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию К2

Компоновочные схемы УСС	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Вес приоритета
Схема 1	1	1	4	4	0,400
Схема 2	1	1	4	4	0,400
Схема 3	1/4	1/4	1	1	0,100
Схема 4	1/4	1/4	1	1	0,100

Таблица 4.8 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию КЗ

Компоновочные	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Bec
схемы УСС					приоритета
Схема 1	1	1	1/2	1/2	0,167
Схема 2	1	1	1/2	1/2	0,167
Схема 3	2	2	1	1	0,333
Схема 4	2	2	1	1	0,333

Таблица 4.9 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию К4

Компоновочные	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Bec
схемы УСС					приоритета
Схема 1	1	2	2	1	0,333
Схема 2	1/2	1	1	1/2	0,167
Схема 3	1/2	1	1	1/2	0,167
Схема 4	1	2	2	1	0,333

Компоновочные	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Bec
схемы УСС					приоритета
Схема 1	1	2	2	1	0,333
Схема 2	1/2	1	1	1/2	0,167
Схема 3	1/2	1	1	1/2	0,167
Схема 4	1	2	2	1	0,333

Таблица 4.10 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию К5

Таблица 4.11 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию К6

Компоновочные	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Bec
схемы УСС					приоритета
Схема 1	1	1	1	1	0,250
Схема 2	1	1	1	1	0,250
Схема 3	1	1	1	1	0,250
Схема 4	1	1	1	1	0,250

Таблица 4.12 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию К7

Компоновочные	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Bec
схемы УСС					приоритета
Схема 1	1	3	3	1	0,375
Схема 2	1/3	1	1	1/3	0,125
Схема 3	1/3	1	1	1/3	0,125
Схема 4	1	4	4	1	0,375

Таблица 4.13 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию К8

Компоновочные	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Bec
схемы УСС					приоритета
Схема 1	1	1/3	1/3	1	0,125
Схема 2	3	1	1	3	0,375
Схема 3	3	1	1	3	0,375
Схема 4	1	1/3	1/3	1	0,125

Компоновочные	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Bec
схемы УСС					приоритета
Схема 1	1	5	5	1	0,417
Схема 2	1/5	1	1	1/5	0,083
Схема 3	1/5	1	1	1/5	0,083
Схема 4	1	5	5	1	0,417

Таблица 4.14 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию К9

Таблица 4.15 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию К10

Компоновочные	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Bec
схемы УСС					приоритета
Схема 1	1	2	2	1	0,333
Схема 2	1/2	1	1	1/2	0,167
Схема 3	1/2	1	1	1/2	0,167
Схема 4	1	2	2	1	0,333

Таблица 4.16 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию К11

Компоновочные	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Bec
схемы УСС					приоритета
Схема 1	1	1/4	1/4	1	0,100
Схема 2	4	1	1	4	0,400
Схема 3	4	1	1	4	0,400
Схема 4	1	1/4	1/4	1	0,100

Таблица 4.17 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию К12

Компоновочные	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Bec
схемы УСС					приоритета
Схема 1	1	9	9	1	0,450
Схема 2	1/9	1	1	1/9	0,050
Схема 3	1/9	1	1	1/9	0,050
Схема 4	1	9	9	1	0,450

Компоновочные	Схема 1	Схема 2	Схема3	Схема 4	Bec
схемы УСС					приоритета
Схема 1	1	1/4	1/4	1	0,100
Схема 2	4	1	1	4	0,400
Схема 3	4	1	1	4	0,400
Схема 4	1	1/4	1/4	1	0,100

Таблица 4.18 – Парные сравнения компоновочных схем УСС по критерию К13

Таблица 4.19 – Суммарные итоговые оценки предпочтительности компоновочных схем УСС геохода, полученные методом анализа иерархий

менование схемы		Критерии сравнения (на основе требований к УСС геохода)											вая оценка, $\lambda_i$	
Наи	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	К8	К9	K10	K11	К12	К13	Итого
Схе- ма 1	0,417	0,400	0,167	0,333	0,333	0,250	0,375	0,125	0,417	0,333	0,100	0,450	0,100	0,343
Схе- ма 2	0,417	0,400	0,167	0,167	0,167	0,250	0,125	0,375	0,083	0,167	0,400	0,050	0,400	0,261
Схе- ма 3	0,083	0,100	0,333	0,167	0,167	0,250	0,125	0,375	0,083	0,167	0,400	0,050	0,400	0,157
Схе- ма 4	0,083	0,100	0,333	0,333	0,333	0,250	0,375	0,125	0,417	0,333	0,100	0,450	0,100	0,239

4.2 Влияние геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия на напряженно-деформированное состояние оболочки и внутреннего кольца узла сопряжения секций геохода

4.2.1 Адаптация электронной геометрической модели узла сопряжения секций геохода для определения влияния геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия на напряженно-деформированное состояние его оболочки и внутреннего кольца

Для проведения сравнительного анализа НДС корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС геохода при изменении геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия была взята электронная геометрическая модель узла, разработанная для компоновочной схемы №1 (рисунок 4.2а). Для проведения заявленного численного эксперимента модель требует внесения изменений в конструкцию элементов для передачи тягового усилия.

На предложенной электронной модели элементы для передачи тягового усилия выполнены в виде сплошных колец. Как отмечалось во второй главе, данное конструктивное решение осложняет монтажно-демонтажные работы, что идет в разрез с требованиями к конструкции УСС. Для устранения данного конструктивного недостатка элемент для передачи тягового усилия на внутреннем кольце УСС может быть выполнен в виде закладных сегментных вставок (сухарей). Тогда областью приложения силы взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода, будут участки контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки узла. На рисунке 4.20 представлена схема к определению суммарной площади контакта сухаря  $S_c$  с кольцом для передачи тягового усилия на оболочке УСС.

Общая площадь контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС можно определить по формуле:

$$S_{C} = n_{C} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{D_{\Gamma}}{2} - b_{1}\right)^{2} - \left(R_{\Gamma A E} + b_{2}\right)^{2}\right) \cdot \frac{\left(\gamma_{1} + \gamma_{2}\right)^{\circ}}{360^{\circ}}\right], \quad (4.10)$$

где  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  – углы секторов тягового кольца по крайним точкам по большему и меньшему радиусам окружностей, ограничивающим сухарь, соответственно, град;

*n*<sub>*C*</sub> – количество сухарей, шт.



Рисунок 4.20 – Схема к определению площади контакта сухаря с тяговым кольцом оболочки УСС

Таким образом, на разрабатываемой электронной модели УСС можно варьировать как количество сухарей для передачи тягового усилия, так и их габариты.

В целях упрощения монтажно-демонтажных работ корпус УСС должен разбиваться на секторы. При этом, для равномерного распределения нагрузок от гидроцилиндров трансмиссии, количество секторов корпуса УСС должно быть кратно количеству гидроцилиндров. Принятая трансмиссия геохода состоит из восьми пар гидроцилиндров. Тогда корпусы внутреннего кольца и оболочки УСС могут быть выполнены из 2-х, 4-х или 8-ми сборных секторов. Т.к. корпусы головной и стабилизирующей секций опытного образца геохода имеют деление на 4 сектора, то целесообразно принять аналогичное деление и для УСС.

В целях ускорения расчетов при численном эксперименте в исходной модели были исключены элементы крепления трансмиссии, что, при этом, не несет влияния на определение искомых в ходе эксперимента зависимостей. Представленная на рисунке 4.21 модель включает секторы корпусов внутреннего кольца и оболочки УСС. Количество сухарей для передачи тягового усилия – 8 (по 2 на каждый сектор). Площадь контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС составляет 0,3 от площади сплошного кольца.



Рисунок 4.21 – Электронная геометрическая модель сектора УСС для исследования влияния геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия на НДС элементов узла

4.2.2 Разработка расчетной модели для проведения анализа напряженно-деформированного состояния оболочки и внутреннего кольца узла сопряжения секций геохода при изменении геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия

Для исследования НДС корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС при изменении геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия была составлена расчетная модель. На электронной геометрической модели были

назначены кинематические (крепления) и статические (нагрузки) граничные условия.

В качестве кинематических граничных условий к модели были применены ограничения «Фиксированная геометрия» и «Симметрия». Ограничение «Фиксированная геометрия» приложено к фланцу крепления сектора внутреннего кольца УСС к стабилизирующей секции геохода. Ограничение «Симметрия» позволяет имитировать цельную цилиндрическую оболочку при исследовании ее четвертой части (в данном случае - это секторы корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС), что значительно сокращает время на численный эксперимент. Ограничение «Симметрия» приложено к плоскостям крепления секторов оболочки и внутреннего кольца УСС со смежными секторами. По аналогии с предыдущим экспериментом сила взаимодействия между секциями приложена к фланцу крепления оболочки УСС с головной секцией геохода. В расчетной модели не учитывается влияние сил тяжести конструкции, а также сил трения оболочек секций и УСС о породу, следовательно, для упрощения расчетов, можно пренебречь силами горного давления. Схема нагружения модели УСС представлена на рисунке 4.22.



Рисунок 4.22 – Схема нагружения модели УСС (элементы модели разнесены)

4.2.3 Оценка влияния геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия на напряженно-деформированное состояние оболочки и внутреннего кольца узла сопряжения секций геохода

В ходе проведения численного эксперимента производился ряд расчетов методом конечных элементов. В ходе каждого расчета производилось изменение геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия. Менялось количество сухарей и их площадь.

Т.к. ранее было принято деление корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС на 4 сектора, то количество сухарей должно быть кратным 4-ем. Количество сухарей в ходе эксперимента менялось согласно следующему числовому ряду: 4, 8, 12, 16, 20. Суммарная площадь контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС менялась от 0,1 до 0,9 от площади целого кольца с шагом 0,2.

В результате расчета МКЭ были получены эпюры распределения эквивалентных напряжений в элементах УСС под действием заданных ранее нагрузок (рисунки 4.23-4.27).

Анализ представленных эпюр показывает, что изменение геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия оказывает значительное влияние на картину распределения эквивалентных напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС.

Результаты численного сравнительного эксперимента по исследованию НДС корпусов оболочки и внутреннего кольца при изменении геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия представлены в таблице 4.20.

На основе полученных в ходе эксперимента данных (таблица 4.20) были построены графики зависимостей максимальных напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС от отношения суммарной площади контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС к площади целого кольца  $S_C / S_K$  (рисунки 4.28-4.32).



Суммарная площадь контакта сухарей с кольцом для передачи тягового усилия на оболочке УСС от площади целого кольца: a) 0,1; б) 0,3; в) 0,5; г) 0,7; д) 0,9. Рисунок 4.23 – Эпюры распределения эквивалентных напряжений в корпусах

оболочки и внутреннего кольца УСС при 4-х сухарях (по 1 на сектор)



Суммарная площадь контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС от площади целого кольца: a) 0,1; б) 0,3; в) 0,5; г) 0,7; д) 0,9.

Рисунок 4.24 – Эпюры распределения эквивалентных напряжений в корпусах

оболочки и внутреннего кольца УСС при 8-ми сухарях (по 2 на сектор)



Суммарная площадь контакта сухарей с кольцом для передачи тягового усилия на оболочке УСС от площади целого кольца: a) 0,1; б) 0,3; в) 0,5; г) 0,7; д) 0,9. Рисунок 4.25 – Эпюры распределения эквивалентных напряжений в корпусах

оболочки и внутреннего кольца УСС при 12-ти сухарях (по 3 на сектор)



Суммарная площадь контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС от площади целого кольца: а) 0,1; б) 0,3; в) 0,5; г) 0,7; д) 0,9. Рисунок 4.26 – Эпюры распределения эквивалентных напряжений в корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС при 16-ти сухарях (по 4 на сектор)



Суммарная площадь контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС от площади целого кольца: a) 0,1; б) 0,3; в) 0,5; г) 0,7; д) 0,9. Рисунок 4.27 – Эпюры распределения эквивалентных напряжений в корпусах

псунок 4.27 Этноры распределения эквивалентных напряжении в корпусах

оболочки и внутреннего кольца УСС при 20-ти сухарях (по 5 на сектор)

Таблица 4.20 – Результаты численного сравнительного эксперимента по исследованию НДС корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС при изменении геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия

		Максимальнь	ие значения		
Изменяемн	ые в ходе эксперимента параметры:	эквивалентных	напряжений		
		на корп	Iyeax		
количество сухарей, шт	отношение суммарной площади контакта сухарей с тяговым коль- цом оболочки УСС к площади це- лого кольца S <sub>C</sub> / S <sub>K</sub>	оболочки УСС, МПа	внутреннего кольца УСС, МПа		
	0,1	250,321	110,751		
	0,3	207,325	154,520		
4	0,5	166,354	241,514		
	0,7	134,751	375,320		
	0,9	121,758	649,027		
-	0,1	150,241	85,962		
	0,3	145,254	111,145		
8	0,5	133,790	165,710		
	0,7	125,441	230,321		
	0,9	115,715	375,720		
	0,1	122,128	92,150		
	0,3	120,520	105,024		
12	0,5	118,304	142,214		
	0,7	114,398	198,578		
	0,9	106,703	270,002		
	0,1	112,214	87,180		
	0,3	110,247	98,213		
16	0,5	109,143	119,247		
	0,7	105,294	149,140		
	0,9	102,625	190,276		
	0,1	104,319	84,879		
	0,3	102,515	93,894		
20	0,5	101,025	108,987		
	0,7	99,241	128,502		
	0,9	97,458	150,541		



Рисунок 4.28 – Зависимости максимальных эквивалентных напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС от площади сухарей (отношения суммарной площади контакта сухарей с кольцом для передачи тягового усилия на оболочке УСС к площади целого кольца) при 4-х сухарях



Рисунок 4.29 – Зависимости максимальных эквивалентных напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС от площади сухарей (отношения суммарной площади контакта сухарей с кольцом для передачи тягового усилия на оболочке УСС к площади целого кольца) при 8-ми сухарях



Рисунок 4.30 – Зависимости максимальных эквивалентных напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС от площади сухарей (отношения суммарной площади контакта сухарей с кольцом для передачи тягового усилия на оболочке УСС к площади целого кольца) при 12-ти сухарях



Рисунок 4.31 – Зависимости максимальных эквивалентных напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС от площади сухарей (отношения суммарной площади контакта сухарей с кольцом для передачи тягового усилия на оболочке УСС к площади целого кольца) при 16-ти сухарях



Рисунок 4.32 – Зависимости максимальных эквивалентных напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС от площади сухарей (отношения суммарной площади контакта сухарей с кольцом для передачи тягового усилия на оболочке УСС к площади целого кольца) при 20-ти сухарях

Для соблюдения требования равнопрочности элементов УСС были найдены такие значения отношения суммарной площади контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС к площади целого кольца  $S_C / S_K$ , при котором максимальные напряжения на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС равны. Для этого аппроксимацией значений методом наименьших квадратов были получены уравнения регрессии зависимостей (рисунки 4.28-4.32). Определены коэффициенты детерминации. Путем сопоставления полученных уравнений регрессии найдены искомые значения  $S_C / S_K$ . Также были определены значения напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС, при которых выполняется требование равнопрочности элементов УСС  $\sigma_{\text{равн}}$ . Результаты расчетов представлены в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Результаты определения величины отношения S<sub>C</sub> / S<sub>K</sub> при котором максимальные эквивалентные напряжения на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС равны

Кол- во суха- рей	Уравнение р	егрессии зависимости	Коэффи- циент де- термина- ции R <sup>2</sup>	Значение <i>S<sub>C</sub>/S<sub>K</sub></i> *	Значе- ние σ <sub>равн</sub> , МПа**
4	на корпусе оболочки УСС	$y = 172,76x^{3} - 135,26x^{2}$ $- 182,66x + 269,74$	0,9999	0,39	188,178
	на корпусе внутр. кольца УСС	$y = 1007x^{3} - 605,76x^{2} + + 362,2x + 78,303$	0,9994		
8	на корпусе оболочки УСС	$y = 53,125x^{3} - 91,05x^{2} - 0,4512x + 151,34$	0,9964	0.42	139,025
0	на корпусе внутр. кольца УСС	$y = 535,48x^{3} - 355,94x^{2} + 230,85x + 64,614$	0,9978	0,42	
12	на корпусе оболочки УСС	$y = -33,135x^{3} +$ $24,946x^{2} -$ $- 14,074x + 123,33$	0,9999	0.39	110 (70
12	на корпусе внутр. кольца УСС	$y = -96,417x^{3} +$ 387,97x <sup>2</sup> - - 77,917x + 96,144	0,9999		119,070
16	на корпусе оболочки УСС	$y = 3,3021x^{3} - 12,362x^{2}$ $- 2,6291x + 112,49$	0,9866	0.42	109.45
10	на корпусе внутр. кольца VCC $y = 12,938x^3 + 103,92x^2$ + 13,173x + 84,76		0,9999	0,72	109,43
20	на корпусе оболочки УСС	$y = -3,2604x^{3} + 4,4406x^{2} - 10,05x + 105,27$	0,9996	0,41	101,671

Кол- во суха- рей	Уравнение ре	егрессии зависимости	Коэффи- циент де- термина- ции R <sup>2</sup>	Значение <i>S<sub>C</sub>/S<sub>K</sub></i> *	Значе- ние σ <sub>равн</sub> , МПа**			
	на корпусе внутр. кольца УСС	$y = -37,021x^{3} + 109,94x^{2} + + 5,8245x + 83,238$	0,9999					
* отношение суммарной площади контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС к площади целого кольца при котором максимальные напряжения на кор- пусах оболочки и внутреннего кольца УСС равны ** значения напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС при которых выполняется требование равнопрочности элементов VCC								

График зависимости значений напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС, при которых выполняется требование равнопрочности элементов УСС  $\sigma_{\text{равн</sub>}$ , от количества сухарей представлен на рисунке 4.33.



Рисунок 4.33 – Зависимость значений напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС, при которых выполняется требование равнопрочности элементов УСС, от количества сухарей

Анализ представленных графиков (рисунки 4.28-4.32) показывает, что при увеличении отношения суммарной площади контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС к площади целого кольца  $S_C / S_K$  от 0,1 до 0,9 раза происходит:

 при 4-х сухарях уменьшение максимальных напряжений на корпусе оболочки на 51,4%, и увеличение максимальных напряжений на корпусе внутреннего кольца на 82,9%;

 при 8-ми сухарях уменьшение максимальных напряжений на корпусе оболочки на 22,9%, и увеличение максимальных напряжений на корпусе внутреннего кольца на 77,1%;

 при 12-ти сухарях уменьшение максимальных напряжений на корпусе оболочки на 12,6%, и увеличение максимальных напряжений на корпусе внутреннего кольца на 65,8%;

 при 16-ти сухарях уменьшение максимальных напряжений на корпусе оболочки на 8,5%, и увеличение максимальных напряжений на корпусе внутреннего кольца на 54,1%;

– при 20-ти сухарях уменьшение максимальных напряжений на корпусе оболочки на 6,6%, и увеличение максимальных напряжений на корпусе внутреннего кольца на 43,6%.

Отношение суммарной площади контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС к площади целого кольца, при котором максимальные напряжения на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС равны, при увеличении количества сухарей от 4-х до 20-ти колеблется в диапазоне от 0,39 до 0,41.

Анализ графика зависимости на рисунке 4.33 показывает, что значения напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС, при которых выполняется требование равнопрочности элементов УСС уменьшаются:

– на 26,1% при увеличении количества сухарей с 4-х до 8-ми;

- на 13,9% при увеличении количества сухарей с 8-ми до 12-ти;
- на 8,5% при увеличении количества сухарей с 12-ти до 16-ти;

– на 7,1% при увеличении количества сухарей с 16-ти до 20-ти.

Таким образом, при диаметре геохода 3,2 метра, увеличение количества сухарей больше 12 штук мало влияет на изменение значений максимальных напряжений, при которых соблюдается требование равнопрочности корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС геохода.

## 4.3 Выводы

1. Разработана модель взаимодействия элементов УСС геохода между собой. Разработанная модель предусматривает исполнение по 4-м вариантам компоновочных схем УСС. Определены усилия, прилагаемые к элементам УСС во время перемещения геохода.

2. Установлено, что при количестве конечных элементов, размещенных по ширине тягового кольца УСС, от 2-х и более результаты моделирования мало зависят от плотности сетки.

3. Наибольшее значение максимальные эквивалентные напряжения принимают:

 на корпусе оболочки УСС при компоновочной схеме 2, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 9%;

на корпусе внутреннего кольца УСС при компоновочной схеме 1,
 наименьшее – при схеме 2. Разница значений составляет 17,5%;

на фланце крепления оболочки УСС при компоновочной схеме 3,
 наименьшее – при схеме 4. Разница значений составляет 11%;

на фланце крепления внутреннего кольца УСС при компоновочной схеме 3, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 43%;

 на элементах для передачи тягового усилия на оболочке УСС при компоновочной схеме 4, наименьшее – при схеме 2. Разница значений составляет 3%;

на элементах для передачи тягового усилия на внутреннем кольце УСС
 при компоновочной схеме 3, наименьшее – при схеме 1. Разница значений
 составляет 22,5%;

на элементах крепления гидроцилиндров трансмиссии на оболочке
 УСС при компоновочной схеме 2, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 26,5%;

 на элементах упора гидроцилиндров трансмиссии на внутреннего кольца УСС при компоновочной схеме 3, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 22,5%.

4. Наибольшее значение максимальные радиальные перемещения принимают:

 на корпусе оболочки УСС при компоновочной схеме 2, наименьшее – при схеме 4. Разница значений составляет 75%;

 на корпусе внутреннего кольца УСС при компоновочной схеме 4, наименьшее – при схеме 2. Разница значений составляет 33%.

5. В наибольшей степени отвечают требованиям к УСС компоновочные схемы, в которых оболочка сопрягается с головной секцией геохода (компоновочные схемы 1 и 2). В основном это обусловлено меньшим влиянием данных схем на рост реакции геосреды на внешние движители геохода. При этом компоновочная схема 1 набрала наибольшую суммарную оценку при анализе МАИ из всех рассмотренных схем.

6. При увеличении отношения суммарной площади контакта сухарей с кольцом для передачи тягового усилия на оболочке УСС к площади целого кольца  $S_C / S_K$  от 0,1 до 0,9 раза происходит:

 при 4-х сухарях уменьшение максимальных напряжений на корпусе оболочки на 51,4%, и увеличение максимальных напряжений на корпусе внутреннего кольца на 82,9%;

 при 8-ми сухарях уменьшение максимальных напряжений на корпусе оболочки на 22,9%, и увеличение максимальных напряжений на корпусе внутреннего кольца на 77,1%;

 при 12-ти сухарях уменьшение максимальных напряжений на корпусе оболочки на 12,6%, и увеличение максимальных напряжений на корпусе внутреннего кольца на 65,8%; при 16-ти сухарях уменьшение максимальных напряжений на корпусе оболочки на 8,5%, и увеличение максимальных напряжений на корпусе внутреннего кольца на 54,1%;

при 20-ти сухарях уменьшение максимальных напряжений на корпусе оболочки на 6,6%, и увеличение максимальных напряжений на корпусе внутреннего кольца на 43,6%.

7. Отношение суммарной площади контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС к площади целого кольца, при котором максимальные напряжения на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС равны, при увеличении количества сухарей от 4-х до 20-ти колеблется в диапазоне от 0,39 до 0,41.

8. Значения напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС, при которых выполняется требование равнопрочности элементов УСС уменьшаются:

на 26,1% при увеличении количества сухарей с 4-х до 8-ми;

– на 13,9% при увеличении количества сухарей с 8-ми до 12-ти;

– на 8,5% при увеличении количества сухарей с 12-ти до 16-ти;

– на 7,1% при увеличении количества сухарей с 16-ти до 20-ти.

9. При диаметре геохода 3,2 метра увеличение количества сухарей больше 12 штук мало влияет на изменение значений максимальных напряжений, при которых соблюдается требование равнопрочности корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС геохода.

Полученные в ходе исследования выводы позволяют сформулировать следующее научное положение:

при количестве сухарей от 4-х до 20-ти штук требование равнопрочности корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС геохода не зависит от их количества и выполняется при суммарной площади контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС равной 39 - 42% от площади целого кольца. При этом увеличение количества сухарей в том же диапазоне ведет к снижению значений максимальных напряжений, при которых соблюдается требование равнопрочности корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС геохода. Влияние количества сухарей на данные напряжения с увеличением количества сухарей снижается.

## 5 РАЗРАБОТКА УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ СЕКЦИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ГЕОХОДА

5.1 Методика определения параметров узла сопряжения секций геохода

Последовательность определения параметров УСС геохода представлена на блок-схеме (рисунок 5.1).

1) Исходные данные.

Исходными данными к определению параметров УСС геохода являются массогабаритные характеристики и конструктивные параметры головной и стабилизирующей секций, силовые параметры исполнительных органов главного забоя (ИОГЗ) и законтурных элементов (ИОЗЭ), а также параметры геосреды. Среди наиболее значимых исходных данных (несущих наибольшее влияние на величины определяемых параметров УСС) можно выделить:  $D_{\Gamma}$  – диаметр геохода; f – коэффициент крепости породы по шкале профессора М.М. Протодьяконова;  $R_O$  – проекция результирующей силы на ось вращения геохода от работы исполнительного органа главного забоя;  $M_{HO}$  – вращающий момент сопротивления резанию на исполнительном органе главного забоя.

Массогабаритные характеристики и конструктивные параметры головной и стабилизирующей секций геохода определяются согласно эскизной конструкторской документации на секции. Параметры геосреды определяются по справочной литературе исходя из технического задания на проектирование геохода. Определению параметров исполнительных органов геохода посвящены работы [35,36].

В таблице 5.1 представлены силовые параметры ИОГЗ барабанного типа и ИОЗЭ корончатого типа, определенные по рекомендациям [35,36] для геоходов типоразмерного ряда проходческих щитов ЦНИИподземмаша.

Диа-	Исполнительный		Исполнительные		Исполнительные	
метр	орган г.	лавного	органы 1	внешнего	органы элементов	
геохода,	забоя		движ	ителя	противовращения	
$D_{\Gamma}$ , м	$R_O, \mathrm{H}$	<i>М<sub>ИО</sub></i> , Нм	<i>R<sub>ИОВДН</sub>, Н</i>	<i>М<sub>ИОВД</sub></i> , Нм	<i>R<sub>ИОЭПН</sub></i> , Н	<i>М<sub>ИОЭП</sub></i> , Нм
2,1	$1,654 \cdot 10^5$	$1,404 \cdot 10^5$	$0,899 \cdot 10^4$	$1,905 \cdot 10^4$	$3,024 \cdot 10^4$	$0,450 \cdot 10^5$
2,6	$2,047 \cdot 10^5$	$1,739 \cdot 10^5$	$1,060 \cdot 10^4$	$3,270 \cdot 10^4$	$4,539 \cdot 10^4$	$0,530 \cdot 10^5$
3,2	$2,520 \cdot 10^5$	$2,140 \cdot 10^5$	$2,017 \cdot 10^4$	$3,516 \cdot 10^4$	$4,922 \cdot 10^4$	$1,011 \cdot 10^5$
4,1	$3,229 \cdot 10^5$	$2,742 \cdot 10^5$	$2,443 \cdot 10^4$	$6,901 \cdot 10^4$	$6,126 \cdot 10^4$	$1,135 \cdot 10^5$
5,6	$4,410 \cdot 10^5$	$3,745 \cdot 10^5$	$2,884 \cdot 10^4$	$11,38 \cdot 10^4$	$7,457 \cdot 10^4$	$2,025 \cdot 10^5$

Таблица 5.1 – Силовые параметры исполнительных органов для геоходов типоразмерного ряда проходческих щитов ЦНИИподземмаша

2) Выбор компоновочной схемы.

В ходе выполнения исследования в п. 4.1.5 установлено, что в наибольшей степени требованиям к УСС отвечает компоновочная схема №1 из таблицы 2.2, при которой:

 УСС выполнен в виде отдельного модуля с корпусом, состоящим из оболочки и внутреннего кольца;

оболочка УСС сопрягается с головной секцией;

– внутреннее кольцо УСС сопрягается со стабилизирующей секцией;

 со стороны забоя располагается сначала трансмиссия, а затем элементы для передачи тягового усилия.

3) Определение требуемого вращающего момента трансмиссии.

Для определения требуемого вращающего момента трансмиссии необходимы значения массогабаритных параметров вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода. Следовательно, для расчета необходимо принять предварительные (ориентировочные) значения массогабаритных характеристик УСС, которые будут скорректированы позже, после разработки предварительной 3D модели или разработки эскизной КД узла. Далее по выражению (3.31) из модели взаимодействия геохода с геосредой определяется величина требуемого вращающего момента трансмиссии геохода:



Рисунок 5.1 – Блок-схема определения основных параметров УСС геохода
4) Выбор типа трансмиссии.

В п. 1.4 произведен обзор трансмиссий разработанных для геохода. В п. 2.4 за базовую конструкцию была принята трансмиссия геохода на основе гидроцилиндров, расположенных в два ряда и работающих в противофазе (рисунок 2.3) [6,65]. Однако, в зависимости от требований, предъявляемых к трансмиссии геохода, может быть выбрана и иная конструкция трансмиссии.

5) Определение количества и основных параметров гидроцилиндров трансмиссии (для трансмиссий на основе гидроцилиндров).

Тип гидроцилиндров и их количество определяются исходя из требуемого вращающего момента трансмиссии. Диаметры поршня и штоков гидроцилиндров, а также их номинальное давление выбираются исходя из рекомендаций [6] по стандартным рядам ГОСТ 6540-68.

6) Определение радиуса габарита внутреннего пространства УСС  $R_{\Gamma A E}$ .

Радиус габарита внутреннего пространства при трансмиссии с гидроприводом определяется по формуле (4.1) [6]:

$$R_{\Gamma A E} = \frac{D_{V C T. U I T}}{2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\left(\frac{D_{V C T. U I T}}{2}\right)^2 + L_p^2 - \left(\frac{D_{V C T. \Gamma U}}{2}\right)^2}{D_{V C T. U I T} \cdot L_p}\right)^2} - (0, 75...1) D_{\Pi} \quad (5.2)$$

7) Определение количества секторов на которое делятся корпуса оболочки и внутреннего кольца УСС.

В п. 4.2.3 обосновано разбиение корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС на количество секторов кратное количеству гидроцилиндров трансмиссии.

8) Определение силы взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода *F*<sub>B3</sub>.

Сила взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода определяется по выражению (3.30) из модели взаимодействия геохода с геосредой:

$$F_{B3} = R_{HO3\Pi H} + T_{O5}^{HBP} + G_{HBP} \cdot \sin \alpha + \frac{M_{BP}}{\left(r_{\Gamma} + \frac{h_{3\Pi}}{2}\right)} \cdot f_{TP}$$
(5.3)

9) Выбор количества и определение геометрических параметров сухарей для передачи тягового усилия.

В п. 2.3 и п. 4.2.1 отмечено, что для облегчения монтажно-демонтажных работ элемент для передачи тягового усилия на внутреннем кольце УСС должен быть выполнен в виде закладных сегментных вставок (сухарей). В п. 4.2.3 обосновано, что количество сухарей должно быть кратным количеству секторов на которые разбивается корпус внутреннего кольца УСС. (установлено, что в наибольшей степени требованиям к УСС отвечают конструкции с 12-тью, 16-тью и 20-тью сухарями). Также в п. 4.2.3, исходя из требования равнопрочности элементов УСС, определено, что суммарная площадь контакта сухарей с кольцом для передачи тягового усилия должна составлять около 40 % от площади целого кольца. Суммарная площадь контакта сухарей с кольцом для передачи тягового усилия должна составлять около 40 % от площади целого кольца. Суммарная площадь контакта сухарей с кольцом для передачи тягового усилия должна составлять около 40 % от площади целого кольца.

$$S_{C} = n_{C} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \left( \left( \frac{D_{\Gamma}}{2} - b_{1} \right)^{2} - \left( R_{\Gamma A \mathcal{B}} + b_{2} \right)^{2} \right) \cdot \frac{\left( \gamma_{1} + \gamma_{2} \right)^{\circ}}{360^{\circ}} \right]$$
(5.4)

10) Разработка модели УСС геохода.

На основе полученных параметров разрабатывается предварительная 3D модель и/или эскизная КД узла, после чего определяются массогабаритные характеристики элементов УСС. Исходя из полученных массогабаритных характеристик проводится уточнение параметров УСС, при необходимости вносятся правки его конструкции.

# 5.2 Формирование исходных данных для определения параметров узла сопряжения секций опытного образца геохода

В ходе исследования были получены зависимости, выражения и рекомендации которые позволяют определять параметры и разрабатывать конструктивные решения узла сопряжения секций геохода. В качестве примера были определены параметры и разработана конструкция опытного образца геохода диаметром 3,2 м (модель 401).

Исходные данные для разработки геохода модели 401 заложены в документах, исследованиях и патентах:

1. технические требования к результатам выполнения комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием российского высшего учебного заведения по теме: «Создание и постановка на производство нового вида щитовых проходческих агрегатов многоцелевого назначения – геоходов»;

2. результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ЮТИ ТПУ, ИУ СО РАН и КузГТУ;

3. российские и зарубежные патенты;

4. справочная литература [75].

Определение параметров УСС возможно после определения параметров головной и стабилизирующей секций геохода, а также узлов смонтированных на них. К основным исходным данным относятся массогабаритные характеристики и конструктивные параметры секций, параметры геосреды и силовые параметры исполнительных органов главного забоя (ИОГЗ) и законтурных элементов (ИОЗЭ) (таблица 5.1).

Также были приняты предварительные (ориентировочные) значения массогабаритных характеристик УСС, которые будут скорректированы позже, после разработки предварительной 3D модели или разработки эскизной КД узла (согласно п. 5.1 исследования).

Исходные данные для определения параметров УСС опытного образца геохода диаметром 3,2 м представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Исходные данные для определения параметров УСС опытного образца геохода (модель 401)

Обозна- чение величи- ны	Наименование, единицы измерения			
	Конструктивные величины			
$D_{\Gamma}$	диаметр геохода, м	3,2		
$m_{\Gamma}$	суммарная масса головной секции геохода и смонтированного на ней обору- дования, кг	8500		
m <sub>cm</sub>	суммарная масса стабилизирующей секции геохода и смонтированного на ней оборудования, кг	4750		
h <sub>e</sub>	шаг двухзаходной винтовой линии, вдоль которой располагаются внешние движители геохода, м	0,8		
$h_{\scriptscriptstyle B\!\mathcal{I}}$	высота внешнего движителя геохода, м	0,2		
$h_{_{\!$	высота элемента противовращения геохода, м	0,25		
β	угол подъема винтовой линии, вдоль которой располагается внешний движитель геохода, град	4,55		
$n_{_{\scriptscriptstyle N}}$	количество заполненных лопаток, шт	4		
$b_{\pi}$	длина погрузочной лопатки, м	0,56		
$h_{_{nn}}$	высота погрузочной лопатки, м	0,28		
m	среднее расстояние между лопатками, м	0,45		
$egin{array}{c} d_1 \ d_2 \ d_3 \end{array}$	расстояния от центральной вертикальной оси до линии действия веса горной массы в лопатке, м	0,27 0,76 1,1		
$R_1$	радиус выработки, м	1,6		
$l_{_{\Gamma C}}$	длина головной секции, м	1,9		
$l_{CT}$	длина стабилизирующей секции, м	1,79		
Предварительно принятые массогабаритные характеристики элементов УСС				
$m_{OE}^{_{YCC}}$	масса оболочки УСС, кг	2000		
$m_{_{BH}}^{_{YCC}}$	масса внутреннего кольца УСС, кг	1500		
$l_{ycc}$	длина УСС, м	0,6		
Величины, связанные с параметрами исполнительного органа главного забоя и исполнительных органов законтурных элементов				
R <sub>o</sub>	проекция результирующей силы на ось вращения геохода от работы испол- нительного органа главного забоя (при встречном фрезеровании), Н	$2,520 \cdot 10^5$		

Обозна- чение величи- ны	Наименование, единицы измерения	Значение
М ио	вращающий момент сопротивления резанию на исполнительном органе главного забоя (при встречном фрезеровании), Нм	2,140·10 <sup>5</sup>
R <sub>иовдн</sub>	суммарная нормальных составляющих усилий внедрения исполнительных органов внешних движителей в приконтурный массив при движении агрегата, Н	2,017·10 <sup>4</sup>
<i>R</i> <sub>ИОЭПН</sub>	суммарная нормальных составляющих усилий внедрения исполнительных органов элементов противовращения в приконтурный массив при движении агрегата, Н	4,922·10 <sup>4</sup>
М <sub>ИОВД</sub>	вращающий момент сопротивления резанию на исполнительных органах внешних движителей, Нм	3,516·10 <sup>4</sup>
М <sub>иоэп</sub>	вращающий момент сопротивления резанию на исполнительных органах элементов противовращения, Н·м	1,011·10 <sup>5</sup>
	Величины, связанные с параметрами геосреды и режимами работы геохода	
$\gamma_{\Pi OP}$	удельный вес пород, Н/м <sup>3</sup>	22000
ρ	угол внутреннего трения породы, град	31,383
$P_0$	сила сопротивления геосреды упругопластическому сжатию, Н/м	$11.10^{3}$
Русл	силовой параметр, характеризующий сопротивление геосреды упруго- пластическому сжатию, Н/м	61,9·10 <sup>3</sup>
h <sub>ycл</sub>	линейный параметр, характеризующий сопротивление геосреды упруго- пластическому сжатию, Н/м	0,639
$f_{mp}$	коэффициент трения стали по породе в условиях сухого трения	0,61
φ	коэффициент, учитывающий влияние угла резания	0,59
$f_{\scriptscriptstyle mp1}$	коэффициент трения скольжения стали по стали в условиях сухого трения	0,15
f	коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова	1
λ	коэффициент бокового давления породы	0,333
$a_1$	постоянный эмпирический коэффициент	0,3
n <sub>n</sub>	коэффициент перегрузки погрузочного органа	0,7
<i>K</i> <sub><i>n</i></sub>	коэффициент, учитывающий назначение выработки	1,2
m <sub>e</sub>	коэффициент, учитывающий влияние способа проходки выработки	1,1
K <sub>P</sub>	коэффициент условий работы породного массива	1,3
<i>K</i> <sub>3</sub>	Коэффициент заполнения лопатки погрузочного органа	0,4

### 5.3 Разработка узла сопряжения секций опытного образца геохода

Согласно разработанной методике (п. 5.1) были определены параметры УСС опытного образца геохода, разработана эскизная КД УСС. Были определены конечные массогабаритные характеристики элементов УСС, на основании которых проведен проверочный расчет требуемого вращающего момента трансмиссии и силы взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода. Параметры УСС опытного образца геохода диаметром 3,2 м (модель 401) представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Параметры УСС опытного образца геохода диаметром 3,2 м (модель 401)

	Ссылка				
Параметр	формула	рисунок	параграф иссле- дования с реко- мендациями	Значение	
Компоновочная схема	_	_	п. 4.1.5	схема №1 из таблицы 2.2	
Величина тре- буемого вра- щающего мо- мента трансмис- сии геохода, Н·м	(3.31)	_	_	1,76·10 <sup>6</sup>	
Тип трансмис- сии	_	_	п. 2.4 [6,65]	на основе гид- роцилиндров, расположенных в два ряда и ра- ботающих в противофазе	
Количество гид- роцилиндров трансмиссии, шт	_	_	п. 4.1.1	16	
Диаметр поршня гидроцилиндров, м	_	-	п. 4.1.1	0,09	
Диаметр штока гидроцилиндров, м	_	_	п. 4.1.1	0,056	

Продолжение таблицы 5.3

пространства, м Количество секторов на которое делятся корпуса

Сила взаимодей-

не вращающейся частями корпуса

(3.30)

ствия между вращающейся и

оболочки и внутреннего кольца, шт

Параметр	формула	рисунок	параграф иссле- дования с реко- мендациями	Значение	
Номинальное давление, МПа	_	_	п. 4.1.1	20	
Радиус габарита	(4 1) [6]			12	

п. 4.2.3

на 4 каждый

 $1,08 \cdot 10^{6}$ 

nao manina Roping oa					
геохода, Н					
Количество су-		_	п. 4.2.3	12	
харей, шт				12	
Ширина сухаря,	(4.10)	_	_	0,225	
Μ	(4.10)				
Конечные массогабаритные характеристики элементов УСС					
Масса оболочки,				2250	
КГ	0 <b>00</b>				
Масса внутрен-	ботки	1800			
него кольца, кг	ООТКИ				
Длина, м			0,767		

На основании проведенных расчетов и исследований была разработана конструкторская документация на изготовление УСС опытного образца геохода (рисунок 5.2). Общий вид УСС опытного образца геохода представлен на рисунке 5.3. Общий вид опытного образца геохода диаметром 3,2 м представлен на рисунке 5.4. Испытания геохода на площадке ОАО КОРМЗ подтвердили, что УСС обеспечивает непрерывность вращения головной секции геохода с одновременной передачей тягового усилия к стабилизирующей секции.



Рисунок 5.2 – Фрагмент сборочного чертежа УСС опытного образца геохода диаметром 3,2 м (модель 401)











г)

a) общий вид опытного образца УСС геохода; б) стабилизирующая секция геохода в сборе с внутренним кольцом узла сопряжения секций геохода; в) головная секция геохода в сборе с внешним кольцом узла сопряжения секций геохода; г,д) корпус узла сопряжения секций геохода в сборе

Рисунок 5.3 – УСС опытного образца геохода диаметром 3,2 м (модель 401)





а) опытный образец геохода в сборочном цехе;
б) опытный образец геохода в цехе перед приемочными испытаниями Рисунок 5.4 – Опытный образец геохода диаметром 3,2 м (модель 401)

## 5.4 Выводы

1. Разработана методика определения параметров узла сопряжения секций геохода. 2. Определены параметры УСС опытного образца геохода диаметром 3,2 метра.

3. Разработана конструкторская документация и изготовлен узел сопряжения секций опытного образца геохода диаметром 3,2 метра.

4. Испытания опытного образца геохода показали, что разработанный УСС обеспечивает непрерывность вращения головной секции геохода с одновременной передачей тягового усилия к стабилизирующей секции.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В научно-квалификационной работе решена актуальная задача обоснования параметров узла сопряжения секций проходческой техники нового класса – геохода, что вносит существенный вклад в горное машиностроение и экономику страны.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Определены особенности работы геохода и сформированы требования к УСС геохода, основными из которых являются:

конструкция УСС должна:

 – обеспечивать минимальное значение силы воздействия движителя геохода на породу контура выработки за ним;

– обеспечивать непрерывность перемещения геохода на забой;

 обеспечивать работу геохода при любых углах наклона проводимой выработки;

– быть ремонтопригодной и обеспечивать простоту монтажнодемонтажных работ в стесненных условиях горной выработки;

 иметь достаточное внутреннее пространство для транспортировки отбитой горной породы и доступа к призабойной части выработки;

– обеспечивать равнопрочность элементов УСС.

Выявлены 3 основных вариативных признака, отличающих различные компоновки УСС. Разработано 8 вариантов компоновочных схем УСС геохода. Доказана необходимость создания модульной конструкции узла сопряжения секций, с едиными присоединительными размерами и базовыми поверхностями, на основании чего выбраны 4 предпочтительные компоновочные схемы.

Разработано 5 конструктивных решений, каждое из которых предусматривает исполнение по 4 выбранным компоновочным схемам. Предпочтительным вариантом является конструктивное решение УСС геохода в виде модульного подшипникового узла скольжения без промежуточных антифрикционных тел. 2. Произведена адаптация математической модели взаимодействия геохода с геосредой. Модель учитывает особенности конструкции разрабатываемого опытного образца геохода и позволяет определять усилия, действующие на геоход во время его перемещения, при 4 рассматриваемых вариантах компоновочных схем УСС.

Получены аналитические выражения для определения требуемого вращающего момента трансмиссии, силы взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса и силы реакции геосреды на внешний движитель геохода.

Установлено, что при увеличении доли вращающейся части корпуса геохода от его общей длины от 0,05 до 0,95 происходит:

 монотонное увеличение требуемого вращательного момента трансмиссии на 17%;

 монотонное уменьшение силы взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода на 39%;

 монотонное уменьшение реакции геосреды на внешний движитель геохода на 26%.

При диаметрах геохода от 2,1 до 5,6 метра и углах наклона проводимой выработки от -25° до 25°, при компоновочной схеме с сопряжением оболочки УСС с головной секцией геохода, требуемый вращательный момент трансмиссии  $M_{BP}$  больше на величину от 2% до 4%, сила взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода  $F_{B3}$  меньше на величину от 5% до 7% и реакция геосреды на внешний движитель геохода  $R_{BД}$  меньше на величину от 3% до 5%, чем при компоновочной схеме с сопряжением оболочки УСС со стабилизирующей секцией геохода.

3. Разработана модель взаимодействия элементов УСС геохода между собой. Разработанная модель предусматривает исполнение по 4-м вариантам компоновочных схем УСС.

Определены усилия, прилагаемые к элементам УСС во время перемещения геохода. Для геохода диаметром 3,2 метра, при сопряжении оболочки УСС с го-

ловной секцией сила взаимодействия между секциями равна 1,08 МН, а усилие, развиваемое одним гидроцилиндром, для достижения требуемого вращательного момента трансмиссии равно  $9,53 \cdot 10^4$  Н. При сопряжении внутреннего кольца УСС с головной секцией сила взаимодействия между секциями равна 1,144 МН. Усилие, развиваемое одним гидроцилиндром, для достижения требуемого вращательного момента трансмиссии равно  $1,01 \cdot 10^5$  Н.

4. Определено влияние компоновочных схем УСС на напряженнодеформированное состояние его элементов. Установлено, что наибольшее значение максимальные эквивалентные напряжения принимают:

 на корпусе оболочки УСС при компоновочной схеме 2, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 9%;

на корпусе внутреннего кольца УСС при компоновочной схеме 1,
 наименьшее – при схеме 2. Разница значений составляет 17,5%;

на фланце крепления оболочки УСС при компоновочной схеме 3,
 наименьшее – при схеме 4. Разница значений составляет 11%;

на фланце крепления внутреннего кольца УСС при компоновочной схеме 3, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 43%;

на элементах для передачи тягового усилия на оболочке УСС
 при компоновочной схеме 4, наименьшее – при схеме 2. Разница значений
 составляет 3%;

 на элементах для передачи тягового усилия на внутреннем кольце УСС при компоновочной схеме 3, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 22,5%;

на элементах крепления гидроцилиндров трансмиссии на оболочке
 УСС при компоновочной схеме 2, наименьшее – при схеме 1. Разница значений
 составляет 26,5%;

– на элементах упора гидроцилиндров трансмиссии на внутреннего кольца УСС при компоновочной схеме 3, наименьшее – при схеме 1. Разница значений составляет 22,5%. Доказано, что в наибольшей степени отвечают требованиям к УСС компоновочные схемы, в которых оболочка сопрягается с головной секцией геохода (компоновочные схемы 1 и 2). В основном это обусловлено меньшим влиянием данных схем на рост реакции геосреды на внешние движители геохода. При этом компоновочная схема 1 набрала наибольшую суммарную оценку при анализе МАИ из всех рассмотренных схем.

5. Определено влияние геометрических параметров сухарей (элементов передачи тягового усилия) на напряженно-деформированное состояние элементов УСС.

Установлено, что отношение суммарной площади контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС к площади целого кольца, при котором максимальные напряжения на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС равны, при увеличении количества сухарей от 4-х до 20-ти колеблется в диапазоне от 0,39 до 0,41.

Доказано, что при диаметре геохода 3,2 метра увеличение количества сухарей больше 12 штук мало влияет на изменение значений максимальных напряжений, при которых соблюдается требование равнопрочности корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС геохода.

6. Разработана методика определения параметров узла сопряжения секций геохода. Разработана конструкторская документация и изготовлен узел сопряжения секций опытного образца геохода диаметром 3,2 метра. Разработанный УСС обеспечивает непрерывность вращения головной секции геохода с одновременной передачей тягового усилия к стабилизирующей секции.

Направления дальнейших исследований:

1. Разработка схемных решений УСС с возможностью управляющего воздействия при маневрировании геохода;

2. Исследование износа трущихся элементов передачи тягового усилия УСС геохода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов, В.В. Геовинчестерная технология и геоходы – инновационный подход к освоению подземного пространства / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков // «Эксперт техника», информационно-аналитический журнал. – №1. – 2008. – С. 54-58.

2. Аксенов, В.В. Обоснование необходимости создания нового инструментария для освоения недр и формирования подземного пространства / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков // Диагностика и безопасность. Сб. научных трудов. г. Кемерово. – 2008. – С. 9-22.

3. Аксенов, В.В. Разработка требований к основным системам геохода / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев, А.В. Сапожкова // Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров: Ш Международный научно-методический семинар – Сусс (Тунис), Донецк, Дон ПТУ. – 2009. – с. 123-129.

4. Аксенов, В.В. Научные основы геовинчестерной технологии проведения горных выработок и создания винтоповоротных агрегатов: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.05.06 / Аксенов Владимир Валерьевич. – Кемерово, 2004. – 307 с.

Ефременков, А.Б. Разработка научных основ создания систем геохода:
 дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / Ефременков Андрей Борисович. – Юрга, 2016. –
 314 с.

 Блащук, М.Ю. Обоснование параметров трансмиссии геохода с гидроприводом: дис. ... кан-та техн. наук: 05.05.06 / Блащук Михаил Юрьевич. – Юрга, 2012. – 155 с.

7. Тимофеев, В.Ю. Обоснование параметров трансмиссии геохода с волновой передачей: дис. ... кан-та техн. наук: 05.05.06 / Тимофеев Вадим Юрьевич.
– Юрга, 2012. – 145 с.

8. Бегляков, В.Ю. Обоснование параметров поверхности взаимодействия исполнительного органа геохода с породой забоя: дис. ... кан-та техн. наук: Бегляков Вячеслав Юрьевич. – Юрга, 2012. – 139 с.

9. Дронов, А.А. Обоснование необходимости разработки узла сопряжения секций геоходов / А.А. Дронов // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVII Международного симпозиума им. академика М.А. Усова. – 2013. – В.2. – С. 313–314.

10. Блащук, М.Ю. Особенности работы и требования к узлу сопряжения секций геохода / М.Ю. Блащук, А.А. Дронов, Д.А. Михеев // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции. Кемерово: Институт угля СО РАН. – 2014. – С. 104–106.

11. Аксенов, В.В. Геовинчестерная технология проведения горных выработок / В.В. Аксенов. – Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2004. – 264 с., ил.

12. Ермаков, А.Н. Обзор существующих решений исполнительных органов для формирования каналов за контурами выработки / А.Н. Ермаков, В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, К.А. Ананьев // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 12. — С. 20–24.

13. Эллер, А.Ф. Винтоповоротные проходческие агрегаты / А.Ф. Эллер,
В.Ф. Горбунов, В.В. Аксенов. — Новосибирск : ВО «Наука», 1992. — 192 с.

14. Горбунов, В.Ф. Проектирование и расчет проходческих комплексов / В.Ф. Горбунов, В.В. Аксенов, А.Ф. Эллер. – Новосибирск: Наука. 1987. – 191 с.

15. А.С.1229354 СССР, МКИ Е21D9/06. Проходческий щитовой агрегат /
В.Ф.Горбунов, А.Ф. Эллер, В.В. Аксенов, В.Д. Нагорный, В.М. Скоморохов. –
№ 3999455/22-03; заявл. 23.10.85; Опубл. 07.08.87.

16. А.С.1328531 СССР, МКИ Е21D9/06. Проходческий щитовой агрегат / А.Ф. Эллер, В.В. Аксенов, В.Д. Нагорный, В.Ф.Горбунов. - № 3734045/22-03; заявл. 24.04.84; Опубл. 07.05.86.

17. А.С. 2066762 СССР, МКИ Е21D9/06. Проходческий щитовой агрегат / А.Ф. Эллер, В.В. Аксенов, Н.Б. Пушкина. - № 93027076/03; заявл. 11.05.93 Опубл. 20.09.96.

18. А.С.1668678 СССР, МКИ Е21D9/06. Проходческий щитовой агрегат / А.Ф. Эллер, В.Ф.Горбунов, В.В. Аксенов, Н.Б. Пушкина, Л.А. Саруев, П.Я Крау-иньш. - № 4726630/03; заявл. 02.08.89; Опубл. 07.08.91.

19. А.С.1719642 СССР, МКИ Е21D9/06. Проходческий щитовой агрегат / А.Ф. Эллер, В.Ф.Горбунов, В.В. Аксенов, Н.Б. Пушкина, Л.А. Саруев, П.Я Крау-иньш. - № 4257949/03; заявл. 04.05.87; Опубл. 15.03.92.

20. Блащук, М.Ю. Обзор опорно-поворотных устройств горной и строительной техники в целях создания узла сопряжения секций геохода / М.Ю. Блащук, А.А. Дронов // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: сборник трудов XV международной научнопрактической конференции. Кемерово: Институт угля СО РАН. – 2013. – С. 97–100.

21. Дронов, А.А. Формирование требований к узлу сопряжения секций геохода / А.А. Дронов, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 8 (126). – С. 39–42.

Барсов, И.П. Строительные машины и их эксплуатация / И.П. Барсов,
 А.П. Станковский. – М.: Стройиздат. – 1971. – 368 с.: ил.

23. Невзоров, Л.А. Устройство и эксплуатация грузоподъемных кранов: учебник для нач. проф. образования. / Л.А. Невзоров, Ю.И. Гудков, М.Д. Полосин. – М.: Академия. – 2008. – 448 с.

24. Щадов, М.И. Справочник механика открытых работ. Экскавационнотранспортные машины непрерывного действия. / М.И. Щадов, В.М. Владимиров. – М.: Недра. – 1989. – 489 с.: ил.

25. Аксенов, В.В. Оценка возможности использования в трансмиссии геохода механических передач / В.В. Аксенов, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев // Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 12. – С. 69–74.

26. Аксенов, В.В. Анализ возможных вариантов электропривода и механических передач в трансмиссии геохода / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю.

Тимофеев, М.Ю. Блащук // Горный информационный аналитический бюллетень. Горное машиностроение. – М.: МГГУ. – 2010. – ОВ №3. – С. 154-163.

27. Аксенов, В.В. Оценка возможности применения редукторного привода в трансмиссии геохода. / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, В.И. Нестеров, М.Ю. Блащук // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 5 (93). – С. 18–21.

28. Аксенов, В.В. К вопросу о применении редукторного привода в трансмиссии агрегата для проведения аварийно-спасательных выработок (геохода). / В.В. Аксенов, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев, В.Ф. Горбунов // Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 9. – С. 25–35.

29. Аксенов, В.В. Разработка и анализ возможных вариантов гидро- и электропривода в трансмиссии геохода / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Тимофеев, М.Ю. Блащук // Вестник КузГТУ. – Кемерово. – 2010. – № 3. – С. 7-14.

30. Аксенов, В.В. Особенности трансмиссии геохода с гидроцилиндрами в разных фазах выдвижения / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S2. – С. 37–42.

31. Аксенов, В.В. Синтез вариантов схемных решений трансмиссии геохода с волновой передачей / В.В. Аксенов, В.Ю. Тимофеев // Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № S6. – С. 426–439.

32. Аксенов, В.В. Создание схемного решения привода геохода с волновой передачей с промежуточными телами качения с полым валом / В.В. Аксенов, В.Ю. Тимофеев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 6. – С. 41–44.

33. Аксенов, В.В. Разработка схемного решения привода геохода с волновой передачей с промежуточными телами качения / В.В. Аксенов, В.Ю. Тимофеев, М.Ю. Блащук // Горный информационный аналитический бюллетень (научнотехнический журнал). – 2012. – № S3. – C. 167–175. 34. Бегляков, В.Ю. Поверхность забоя при проходке горной выработки геоходом. / В.Ю. Бегляков, В.В. Аксенов // Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. – 2012. – 149 с.

35. Ананьев, К.А. Создание исполнительного органа геохода для разрушения пород средней крепости: дис. ... кан-та техн. наук: 05.05.06 / Ананьев Кирилл Алексеевич. – Кемерово, 2016. – 144 с.

36. Ермаков, А.Н. Обоснование параметров законтурных исполнительных органов геоходов для разрушения пород средней крепости: дис. ... кан-та техн. наук: 05.05.06 / Ермаков Александр Николаевич. – Кемерово, 2016. – 158 с.

37. Садовец, В.Ю. Обоснование конструктивных и силовых параметров ножевых исполнительных органов геоходов: дис. ... кан-та техн. наук: 05.05.06 / Садовец Владимир Юрьевич. – Кемерово, 2007. – 153 с.

38. Аксенов, В.В. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород, вмещающих выработку с системой законтурных винтовых и продольных каналов / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, Е.В. Резанова // Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № ОВ №2. – С. 24–42.

39. Баклашев, И.В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. / И.В. Баклашев, Б.А. Картозия // М.: Студент. – 2012. – 543 с.

40. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений. / Н.С. Булычев. // М.: Недра. – 1989. – 270 с.

41. Аксенов, В.В. Моделирование взаимодействия корпуса носителя геохода с геосредой / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Тимофеев, М.Ю. Блащук // Горный информационный аналитический бюллетень. Горное машиностроение / Москва, МГГУ. – 2010 – ОВ №3. – С. 41-48.

42. Ананьев, К.А. Выбор принципиальной компоновочной схемы барабанных исполнительных органов разрушения забоя для геоходов / К.А. Ананьев, В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, А.Н. Ермаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 11. — С. 141–143. 43. Ананьев, К.А. Определение зависимости геометрических параметров барабанов разрушения забоя от угла их установки на геоходе / К.А. Ананьев, В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, А.Н. Ермаков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 2. – С. 3–5.

44. Аксенов, В.В. Использование параметров поверхности взаимодействия исполнительного органа геохода с породой забоя для формирования исходных данных к проектированию разрушающего модуля / В.В. Аксенов, К.А. Ананьев, В.Ю. Бегляков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 2. – С. 56–62.

45. Аксенов, В.В. Возможности законтурных исполнительных органов геохода по формированию различных профилей каналов / В.В. Аксенов, К.А. Ананьев, А.Н. Ермаков // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы III Международной научно-практической конференции. — Междуреченск, 2014. — Кемерово, 2014. — С. 12-13.

46. Ермаков, А.Н. Обоснование требований к исполнительным органам формирования законтурных каналов геохода / А.Н. Ермаков, В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, К.А. Ананьев // Вестник кузбасского государственного технического университета. — 2014. — № 2(102). — С. 5-7.

47. Аксенов, В.В. Оценка возможности применения методов имитационного моделирования для определения параметров законтурных исполнительных органов геохода / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, К.А. Ананьев, А.Н. Ермаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 2. — С. 145–152.

48. Мяченков, В.И. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник / В.И. Мяченков, В.И. Мяченков, В.П. Мальцев, В.П. Майборода, В.Б. Петров, А.Н. Фролов. // М.: Машиностроение. – 1989. – 520 с.

49. Александров, В.М. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. / В.М. Александров, М.И. Чебаков. // М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2004. – 304 с.

50. Александров, В.М. Задачи механики сплошных сред со смешанными граничными условиями. / В.М. Александров, Е.В. Коваленко // М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1986. – 336 с.

51. Калиткин, Н.Н. Численные методы. / Н.Н. Калиткин. // М.: Наука. – 1978. – 236 с.

52. Победря, Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. / Б.Е. Победря. // М.: Изд-во МГУ. – 1995. – 298 с.

53. Бахвалов, Н.С. Численные методы. / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков // М.: Наука. – 1987. – 315 с.

54. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. / Саати Т. // М.: Радио и связь. – 1993. – 316 с.

55. Саати, Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети. Пер с англ. / Т. Саати, науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. // М.: Изд-во ЛКИ. – 2008. – 360 с.

56. Тутыгин, А.Г. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий. / А.Г. Тутыгин, В.Б. Коробов // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. – 2010. – № 122. – С. 108–115.

57. Аксенов, В.В. Разработка математической модели взаимодействия геохода с геосредой // В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, А.Б. Ефременков, В.Ю. Тимофеев Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Горное машиностроение. – 2011. – ОВ № 2. – С. 79-91.

58. Ананьев, К.А. Требования к исполнительным органам геоходов / К.А. Ананьев, А.Н. Ермаков, В.Ю. Садовец // Сборник материалов VI Всероссийской, 59-й научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая», 22-25 апр. 2014 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева». – Кемерово, 2014. URL: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2014/materials/pdf1/ GI/GMIK/ананьев/index.html (дата обращения: 05.08.2019).

59. Аксенов, В.В. Формирование требований к основным системам геохода / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Садовец, В.Ю. Тимофеев, М.Ю.

Блащук, В.Ю. Бегляков // Горный информационно–аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Перспективы развития горно-транспортных машин и оборудования. – 2009. – № ОВ 10. – С. 107–118.

60. Аксенов, В.В. Разработка требований к основным системам геохода / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Бегляков, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев, А.В. Сапожкова // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – №5. – С. 3–7.

61. Аксенов, В.В. Формирование требований к энергосиловой установке геохода / В.В. Аксенов, М.Ю. Блащук, Р.В.Чернухин // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. Т. 12. – № 7. – С. 263-267.

62. Аксенов, В.В. Разработка требований к трансмиссии геоходов. / В.В.
Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев. // «Известия ВУЗов.
Горный журнал». – 2009. – №8. – С. 101-103.

63. Efremenkov, A.B. Determination of necessary forces for geohod movement. / A.B. Efremenkov, V.Yu. Timofeev // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST – 2012). – 2012. – B. 2. – C. 1–4.

64. Солод, В.В. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов Учебник для вузов. / В.В. Солод, В.Н. Гетопанов, В.М. Рачек // М.: Недра. – 1982. – 350 с.

65. Аксенов, В.В. Разработка вариантов компоновочных решений гидравлической трансмиссии геохода / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев // Сборник трудов Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых «Инновационные технологии и экономика в машиностроении». – Юрга: ЮТИ ТПУ – 2010 – С.461-466.

66. Blaschuk, M.Y. Geokhod Propel Effort Mathematical Model. / M.Y. Blaschuk, A.A. Dronov, D.A. Miheev // Appl. Mech. Mater. – 2015. – B. 770. – C. 391–396.

67. Аксенов, В.В. Разработка математической модели взаимодействия узла сопряжения секций геохода с геосредой и смежными системами / В.В. Аксенов,

В.Ю. Бегляков, М.Ю. Блащук, А.А. Дронов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – В.2(126). – С. 173–182.

68. Аксенов, В.В. Моделирование взаимодействия элементов узла сопряжения секций геохода / В.В. Аксенов, В.Ю. Бегляков, А.А.Дронов // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 4(138). – С. 27–33.

69. Блащук, М.Ю. Математическая модель для определения усилий, необходимых для перемещения геохода. / М.Ю. Блащук, А.А. Дронов, Д.А. Михеев // Сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Юрга: ЮТИ ТПУ. – 2014. – С. 134–139.

70. Begljakov, V.Yu. Parameters of Force Interaction of Elements the Wave Transmission with Intermediate Rolling Bodies in Geokhd's Transmission. / V.Yu. Begljakov, V.Yu. Timofeev, M.V. Dokhnenko // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – B. 682. – C. 282-287.

71. Свешников, В.К. Гидрооборудование: Международный справочник. Книга 1. Насосы и гидродвигатели: Номенклатура, параметры, размеры, взаимозаменяемость. / В.К. Свешников // М.: Издательский центр «Техинформ» МАИ. – 2001. – 360 с.

72. Зубченко, А.С. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / А.С.
Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширских, Ю.И. Астахов, Л.Г. Голеньшина //
М.: Машиностроение. – 2003. – 784 с.: ил.

73. Алямовский, А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. / А.А. Алямовский // М.: ДМК Пресс. – 2015. – 562 с.: ил.

74. Алямовский, А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. / А.А. Алямовский. // М.: ДМК Пресс. – 2010. – 464 с.: ил.

75. Штумпф, Г.Г. Физикотехнические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна: Справочник. / Г.Г. Штумпф, Ю.А. Рыжков, В.А. Шалманов, А.И. Петров // М.: Недра. – 1994. – 447с.: ил.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Tomsk Polytechnic University» (TPU) Yurga Institute of Technology (affiliate) Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Tomsk Polytechnic University» (YUI) 26, Leningradskaya street, Yurga, 652055, Russia GKPO (National Classification of Enterprises and Organizations): 27631421 2008090 (National Classification of Enterprises and Organizations): 27631421 2008090168 VAT/KPP (Code of Reason for Registration) 2018007264/423002001, BIC 043207001

80.08 20LS № 0212.383

OT

на №

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образовательский Тоиский политехнический университет» (TTIУ) Юргинский технологический институт (филикал) федерального государственного автономного образовательский «Национальный исследовательский поиский политехнический университет» (ОГИ TTIУ) Ленинградская, ул., д 26, г. Юрга, 652055, Россия техн. --7.38451-77767, е-mail: ytitpu@ери.ru, uti.tpu.ru ОКПО 27631421, ОГРН 1027000890168 ИНН/ИЛП 70160072641423002001, БИК 043207001

#### СПРАВКА

#### о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Дронова Антона Анатольевича

Настоящей справкой подтверждается, что результаты диссертационной работы Дронова Антона Анатольевича «Обоснование параметров узла сопряжения секций геохода» использованы при разработке опытного образца геохода диаметром 3,2 метра в рамках реализации комплексного проекта «Создание и постановка на производство нового вида щитовых проходческих агрегатов многоцелевого назначения – геоходов» (договор No.02.G25.31.0076 от 23.05.2013г.), выполняемого на основании Постановления Правительства РФ от 09.04.2010г. N 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Директор ЮТИ ТПУ, к.т.н. Д.А. Чинахов Заместитель руководителя проекта, к.т.н. В.Ю. Бегляков

169