

На правах рукописи



Дронов Антон Анатольевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ
СЕКЦИЙ ГЕОХОДА**

Специальность 05.05.06 - «Горные машины»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2020

Работа выполнена в Юргинском технологическом институте (филиале) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, главный научный сотрудник ФИЦ УУХ СО РАН

Аксенов Владимир Валерьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика», главный научный сотрудник Центра научных компетенций Донского государственного технического университета (г. Ростов-на-Дону)

Хазанович Григорий Шнеерович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией подземной разработки угольных месторождений Института горного дела СО РАН (г. Новосибирск)

Леконцев Юрий Михайлович

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (г. Москва)

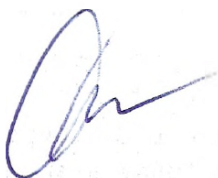
Защита состоится «08» сентября 2020 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Факс (3842) 68-23-23, e-mail: haa.omit@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте:

<http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2020/dro/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «____» июля 2020г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Семькина Ирина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 (хвостовой) 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 влиянии 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 проектно-конструкторских 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 увеличивает-

ся, 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 поддерживается 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 - геогодов», 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, описывается теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** рассмотрена геогодная технология проведения горных выработок и существующие конструкции винтоповоротных проходческих агрегатов (ВПА). Проведены обзоры опорно-поворотных устройств (ОПУ) и подшипниковых узлов роторных исполнительных органов проходческих щитов, а также обзор трансмиссий геогодов. Рассмотрена существующая математическая модель взаимодействия геогода с геосредой. Проведен обзор программных комплексов для проведения расчетов методом конечных элементов (МКЭ). Рассмотрен метод многокритериального выбора альтернатив – метод анализа иерархий (МАИ).

Во **второй главе** разработана структурная схема геогода (рис. 1) на основании которой определено, что в состав УСС геогода входят элементы для передачи тягового усилия, трансмиссия и корпус на котором они монтируются.

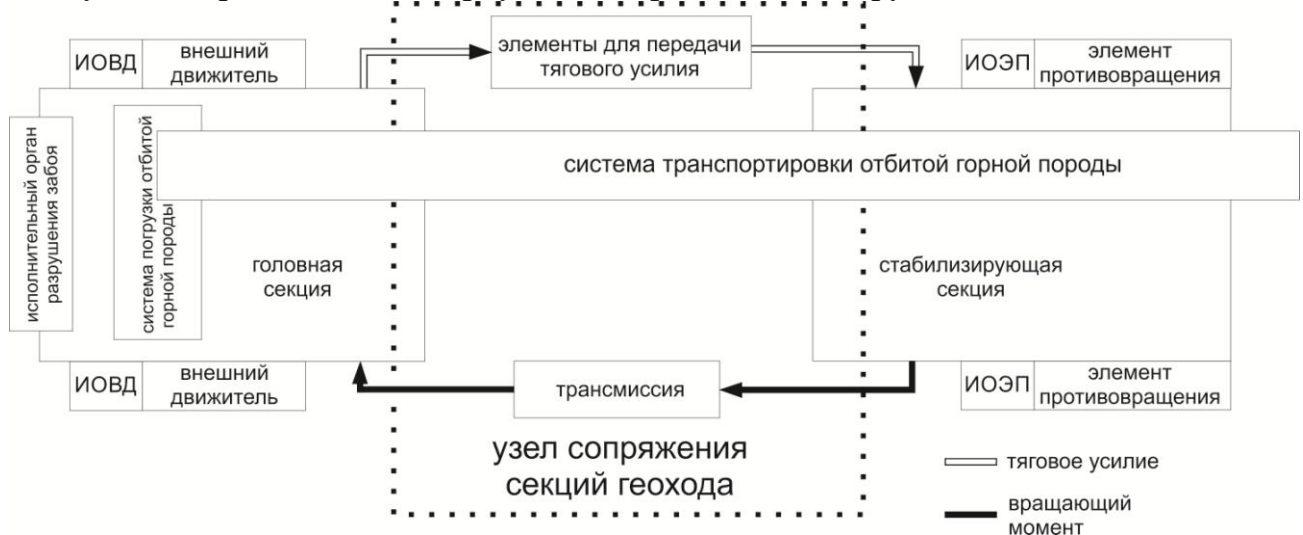


Рисунок 1 – Структурная схема геогода

Определены особенности работы геогода, на основе которых сформированы требования к УСС геогода. Конструкция УСС должна:

- обеспечивать минимальное значение силы воздействия движителя геогода на породу контура выработки за ним;
- обеспечивать непрерывность перемещения геогода 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 ремонтпригодной и обеспечивать простоту монтажно-демонтажных 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.

Были выявлены три основных вариативных признака, отличающих различные компоновки УСС геохода (таблица 1). Исходя из количества выбранных вариативных признаков и количества вариантов исполнения по каждому из них разработано 8 вариантов компоновочных схем УСС геохода (таблица 2).

Таблица 1 – Вариативность исполнения компоновочных схем УСС

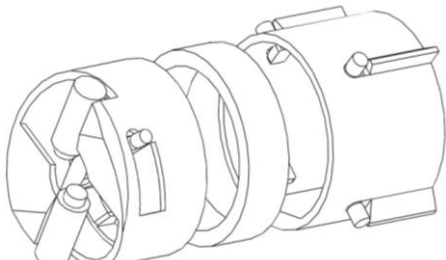
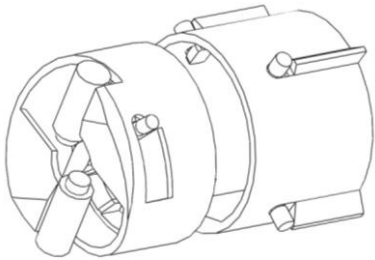
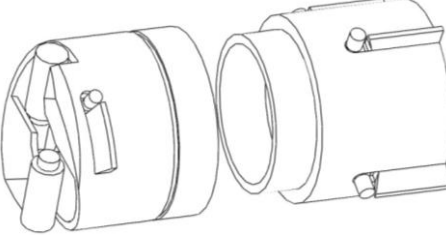
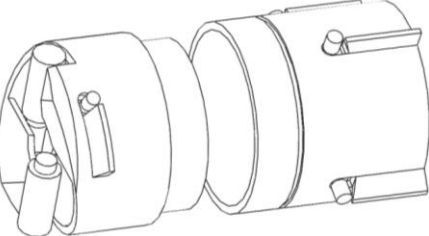
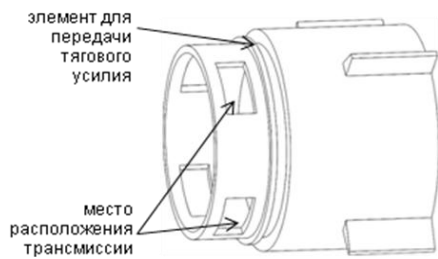
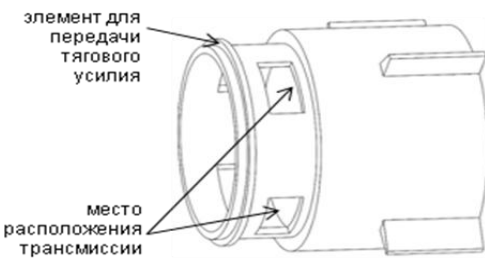
Вариативный признак	Варианты исполнения	
1) По исполнению корпуса		
	1.1) в виде отдельного модуля	1.2) как часть корпусов секций геохода
2) По расположению колец корпуса УСС		
	2.1) оболочка корпуса УСС сопряжена с головной секцией геохода	2.2) оболочка корпуса УСС сопряжена со стабилизирующей секцией
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

Таблица 2 – Варианты компоновочных схем УСС

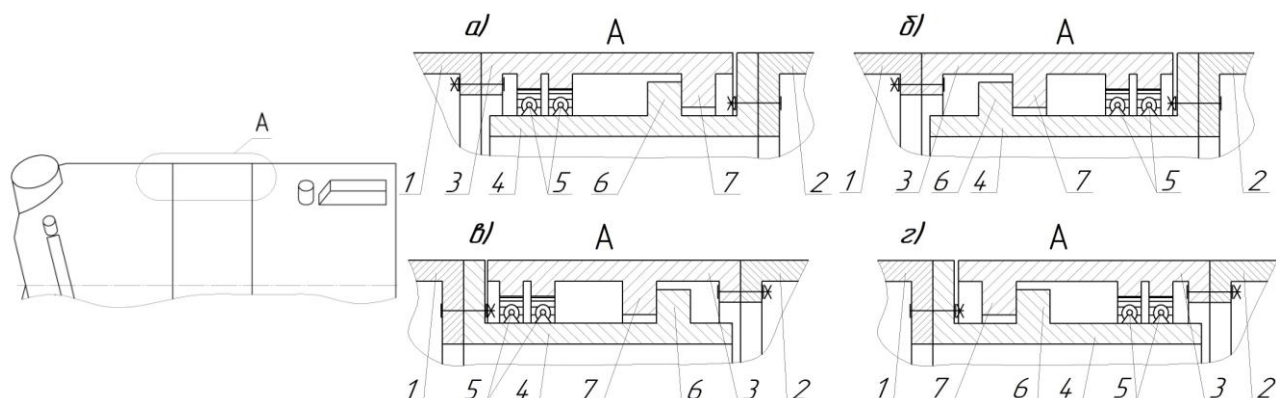
Вариан- тивный признак	Варианты компоновочных схем							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1)	1.1)	1.1)	1.1)	1.1)	1.2)	1.2)	1.2)	1.2)
2)	2.1)	2.1)	2.2)	2.2)	2.1)	2.1)	2.2)	2.2)
3)	3.1)	3.2)	3.1)	3.2)	3.1)	3.2)	3.1)	3.2)

В результате анализа разработанных компоновочных схем установлено, что схемы УСС, выполненные в виде отдельного модуля (таблица 2, схемы 1-4) в большей степени соответствуют требованиям к УСС геохода, чем схемы с корпусом УСС, выполненным как часть корпусов геохода (таблица 2, схемы 5-8). Это обусловлено большей ремонтопригодностью и упрощением процесса монтажно-демонтажных работ в стесненных условиях горной выработки. Таким образом, к дальнейшей проработке приняты компоновочные схемы УСС в виде отдельного модуля.

Были разработаны конструктивные решения УСС геохода:

- на основе катков (колес малого диаметра);
- в виде подшипникового узла качения с роликами в качестве промежуточных тел качения;
- в виде подшипникового узла качения с шариками в качестве промежуточных тел качения;
- в виде подшипникового узла скольжения с промежуточными телами скольжения;
- в виде подшипникового узла скольжения без промежуточных тел скольжения.

В результате анализа разработанных конструктивных решений установлено, что решения с элементами для передачи тягового усилия, построенными по принципу подшипникового узла скольжения 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 (рисунок 2).



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

Рисунок 2 – Конструктивное решение УСС в виде подшипникового узла скольжения без промежуточных тел скольжения

В третьей главе произведена адаптация математической модели взаимодействия геохода с геосредой. Адаптированная математическая модель учитывает особенности конструкции разрабатываемого опытного образца геохода. Модель позволяет определять усилия, действующие на геоход во время его перемещения, при всех рассматриваемых вариантах компоновочных схем УСС. Расчетная схема для определения усилий, действующих на геоход во время его перемещения, и обозначения, примененные на схеме, представлены в таблице 3. При 1-ой и 2-ой компоновочных схемах оболочка УСС сопрягается с головной секцией геохода по секущей плоскости а-а. При 3-ей и 4-ой компоновочных схемах оболочка УСС сопрягается со стабилизирующей секцией геохода по секущей плоскости б-б.

Получены аналитические выражения для определения требуемого вращающего момента трансмиссии M_{BP} (1); силы взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода F_{B3} (2); силы реакции геосреды на внешний движитель геохода R_{BD} (3):

$$M_{BP} = \frac{\left(M_{ИОВД} - M_{ИО} + M_{ГМ} + T_{ОБ}^{BP} \cdot r_{Г} \cdot \cos \beta + \right. \\ \left. + (R_{ИОЭПН} + T_{ОБ}^{HBP} + G_{HBP} \cdot \sin \alpha) \cdot f_{TP1} \cdot r_{KCP} - \sum P \cdot k_1 \right) \cdot \left(r_{Г} + \frac{h_{ЭП}}{2} \right)}{k_2}, \quad (1)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{\left(r_{Г} + \frac{h_{ВД}}{2} \right) \cdot (\sin \beta - f_{TP} \cdot \cos \beta)}{\cos \beta - f_{TP} \cdot \sin \beta};$$

$$k_2 = f_{TP} \cdot k_1 - f_{TP} \cdot f_{TP1} \cdot r_{KCP} + r_{Г} + \frac{h_{ЭП}}{2};$$

$$\sum P = R_{О} + R_{ИОВДН} \cdot \sin \beta + (G_{BP} + G_{HBP}) \cdot \sin \alpha + T_{ОБ}^{BP} \cdot \sin \beta + R_{ИОЭПН} + T_{ОБ}^{HBP}.$$

$$F_{B3} = R_{ИОЭПН} + T_{ОБ}^{HBP} + G_{HBP} \cdot \sin \alpha + \\ + \frac{\left(M_{ИОВД} - M_{ИО} + M_{ГМ} + T_{ОБ}^{BP} \cdot r_{Г} \cdot \cos \beta + \right. \\ \left. + (R_{ИОЭПН} + T_{ОБ}^{HBP} + G_{HBP} \cdot \sin \alpha) \cdot f_{TP1} \cdot r_{KCP} - \sum P \cdot k_1 \right) \cdot f_{TP}}{k_2} \quad (2)$$

$$R_{BD} = \frac{\sum P \cdot k_2 + \left(M_{ИОВД} - M_{ИО} + M_{ГМ} + T_{ОБ}^{BP} \cdot r_{Г} \cdot \cos \beta + \right. \\ \left. + (R_{ИОЭПН} + T_{ОБ}^{HBP} + G_{HBP} \cdot \sin \alpha) \cdot f_{TP1} \cdot r_{KCP} - \sum P \cdot k_1 \right) \cdot f_{TP}}{k_2 \cdot (\cos \beta - f_{TP} \cdot \sin \beta)} \quad (3)$$

Проведены исследования влияния положения границы вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода и компоновочных схем узла сопряжения секций геохода на значения M_{BP} , F_{B3} , R_{BD} (рисунки 3,4).

Таблица 3 – Взаимодействие геохода с геосредой. Схема сил и их обозначения.

Расчетная схема для определения усилий, действующих на геоход во время его перемещения	Обозначение величины	Наименование
	F_T	суммарная сила тяги внешнего движителя
	F_{B3}	сила взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода (на элементах для передачи тягового усилия УСС геохода)
	P_H^{BP}	нормальная составляющая нагрузок от горного давления на вращающуюся часть корпуса геохода
	P_H^{HBP}	нормальная составляющая нагрузок от горного давления на не вращающуюся часть корпуса геохода
	R_0	проекция результирующей силы на ось вращения геохода от работы исполнительного органа главного забоя
	$R_{вд}, R_{эп}$	суммарная реакция геосреды на внешний движитель и элементы противовращения геохода соответственно
	$R_{иовдн}, R_{иоэпн}$	суммарные нормальных составляющих усилий внедрения исполнительных органов внешних движителей и элементов противовращения в приконтурный массив при движении геохода соответственно
	$T_{вд}, T_{эп}$	сила трения внешнего движителя и суммарные силы трения элементов противовращения об вмещающую породу соответственно
	$T_{об}^{BP}, T_{об}^{HBP}$	суммарные силы трения оболочек вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода об вмещающую породу соответственно
	$M_{вр}$	требуемый вращающий момент трансмиссии геохода
	$M_{тр}^{УСС}$	реактивный вращающий момент от силы трения на элементах для передачи тягового усилия УСС геохода
	$M_{ио}, M_{иовд}, M_{иоэп}$	вращающий момент сопротивления резанию на исполнительном органе главного забоя, исполнительных органах внешних движителей и исполнительных органах элементов противовращения соответственно
	$M_{гм}$	вращающий момент, необходимый для перемещения разрушенной породы из нижней части геохода вверх
	$G_{вр}, G_{нвр}$	силы тяжести, действующие на вращающуюся и не вращающуюся части корпуса геохода соответственно
	$r_r = r_{ст}$	радиусы головной и стабилизирующей секций (по оболочке)
	$h_{эп}, h_{вд}$	высота элементов противовращения и внешних движителей геохода соответственно
	α	угол подъёма выработки
	β	угол подъёма внешнего движителя
	ω	угловая скорость вращения головной секции геохода

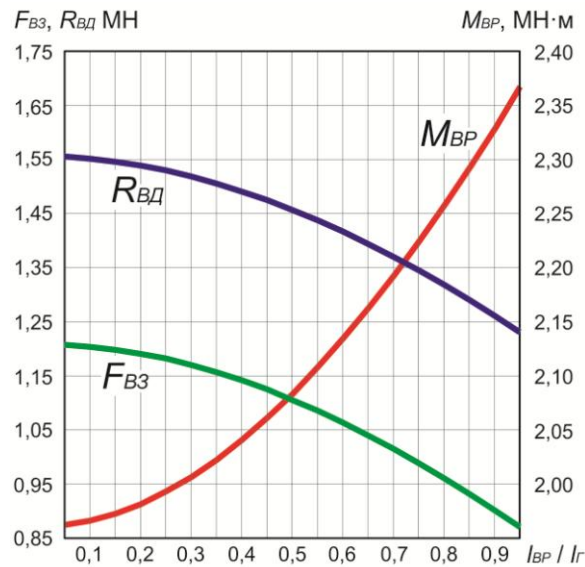


Рисунок 3 – Влияние положения границы вращающейся и не вращающейся частей корпуса геохода на значения M_{BP} , F_{B3} , R_{BD}

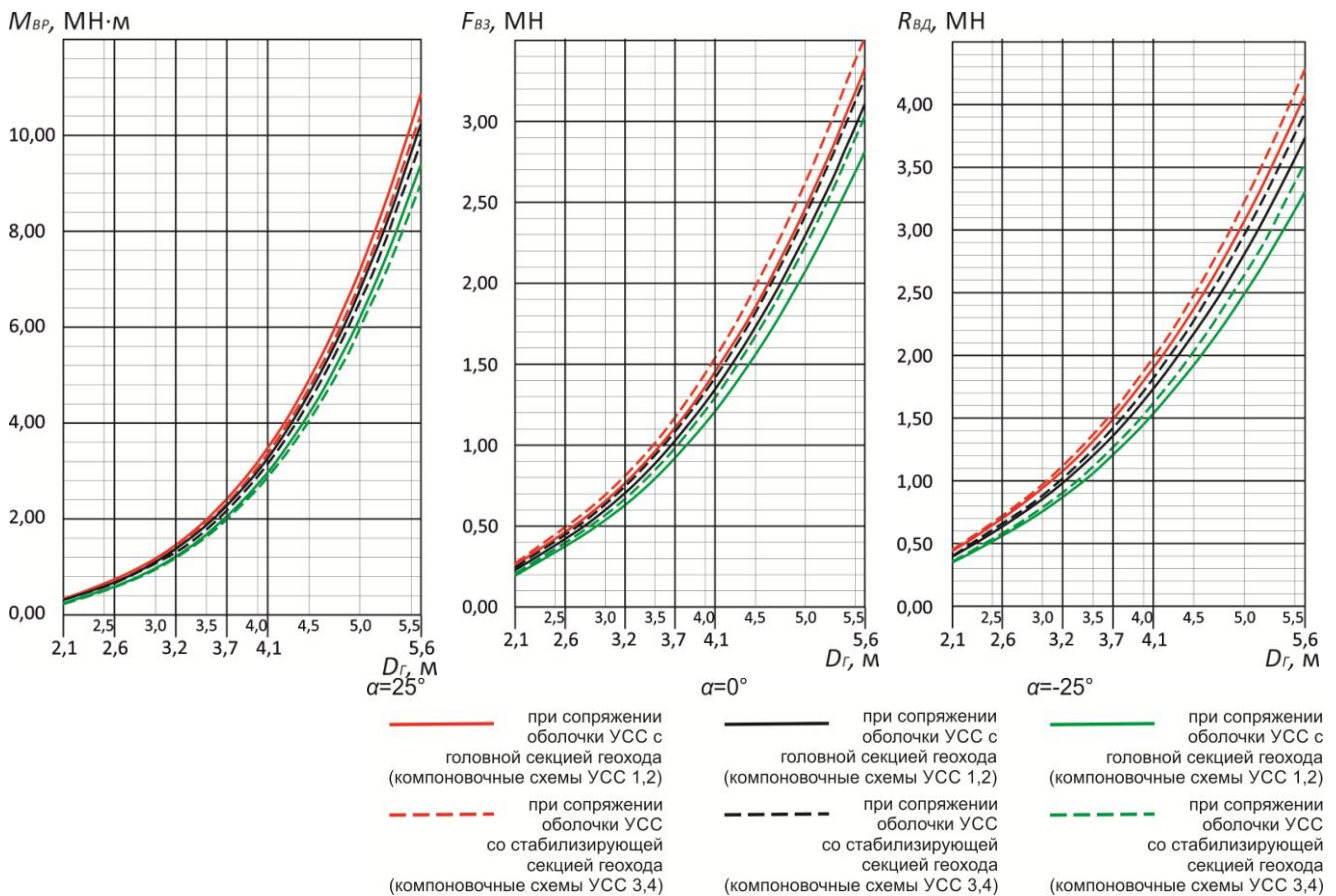


Рисунок 4 – Влияние компоновочных схем УСС на значения M_{BP} , F_{B3} , R_{BD}

При анализе графиков зависимостей (рисунок 3) установлено, что при увеличении доли вращающейся части корпуса геохода от его общей длины ($l_{BP}/l_{Г}$) 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%;

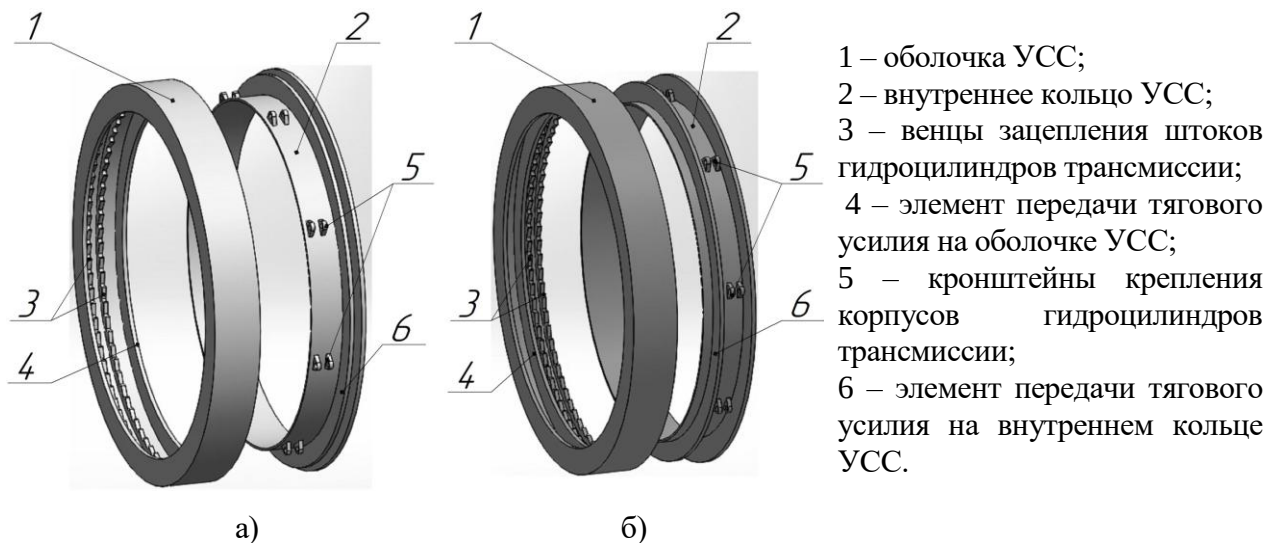
– монотонное уменьшение реакции геосреды на внешний движитель геохода на 26%.

При анализе графиков зависимостей (рисунок 4) установлено, что при диаметрах геохода от 2,1 до 5,6 метра и углах наклона проводимой выработки от -25° до 25° , при компоновочных схемах с сопряжением оболочки УСС с головной секцией геохода (схемы 1,2), 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 $R_{ВД}$ меньше на величину от 3% до 5%, чем при компоновочных схемах с сопряжением оболочки УСС со стабилизирующей секцией геохода (схемы 3,4).

В четвертой главе проведено исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов узла сопряжения секций геохода.

При анализе рассматриваемых компоновочных схем УСС было выявлено, что при компоновочных схемах УСС 1 и 4 и при компоновочных схемах 2 и 3 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 5а). Для компоновочных схем УСС 2 и 3 электронная модель представлена на рисунке 5б).

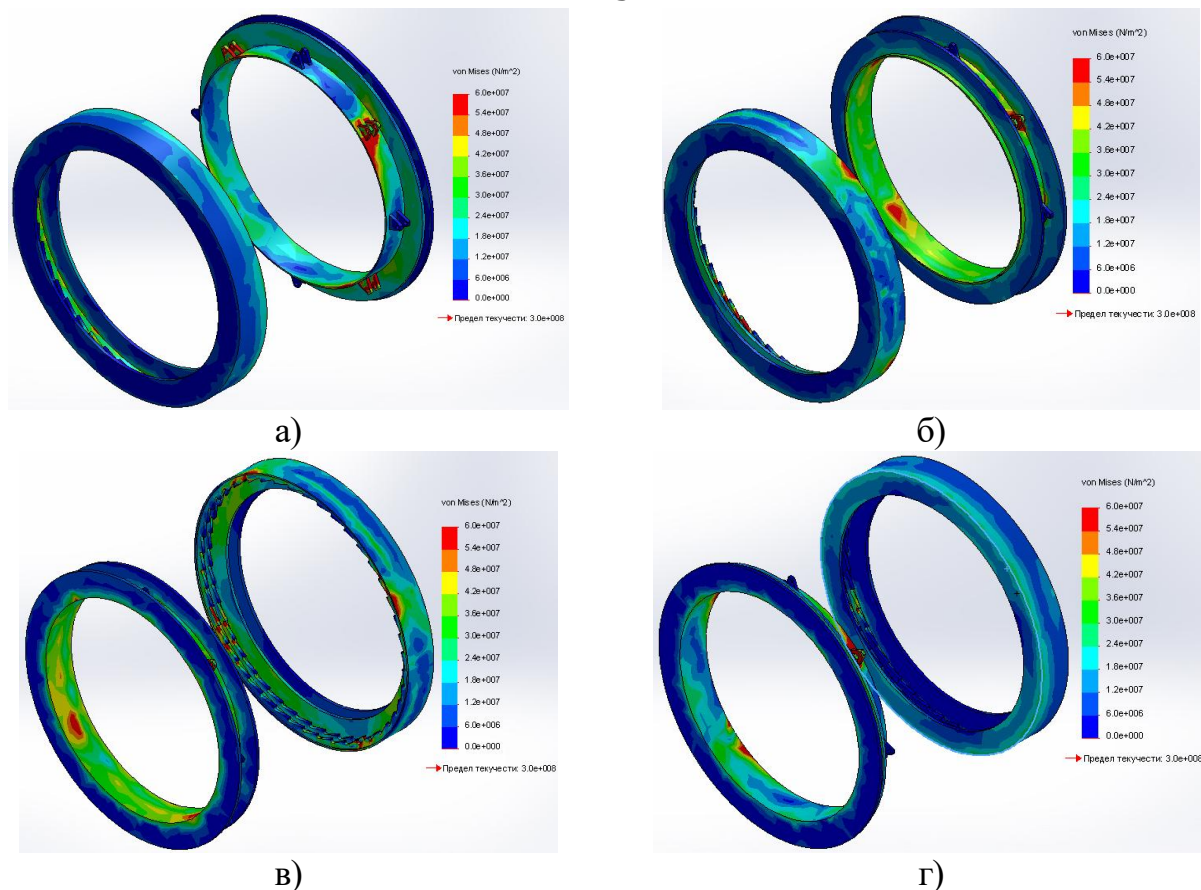


а) электронная геометрическая модель УСС для компоновочных схем 1 и 4;
 б) электронная геометрическая модель УСС для компоновочных схем 2 и 3

Рисунок 5 – Электронные геометрические модели УСС

Для каждой модели были сформированы кинематические (крепления) и статические (нагрузки) граничные условия. Нагрузки рассчитаны по аналитическим выражениям (1-3). В результате расчета методом конечных элементов были получены эпюры распределения эквивалентных напряжений (рисунок 6) и эпюры распределения эквивалентных радиальных перемещений в элементах УСС под действием заданных ранее нагрузок.

Результаты численного сравнительного эксперимента по исследованию НДС элементов УСС в зависимости от выбранной компоновочной схемы узла представлены в таблице 4 (в таблице представлены максимальные эквивалентные нагрузки σ_m и максимальные радиальные перемещения μ в элементах УСС под действием нагрузок).



а) для компоновочной схемы УСС 1; б) для компоновочной схемы УСС 2;
в) для компоновочной схемы УСС 3; г) для компоновочной схемы УСС 4.

Рисунок 6 – Эпюры распределения эквивалентных напряжений в элементах УСС

Таблица 4 – Результаты численного эксперимента по исследованию НДС элементов УСС в зависимости от выбранной компоновочной схемы УСС

Компоновочная схема		Результаты численного эксперимента																			
		Принятые значения величин			для оболочки УСС				для внутреннего кольца УСС												
					корпус	фланец	элемент для передачи тягового усилия	элементы трансмиссии	корпус	фланец	элемент для передачи тягового усилия	элементы трансмиссии									
4	3	2	1	3,2	1,144	1,08	0,095	70,017	75,504	76,574	69,464	σ_m , МПа	μ , мм	σ_m , МПа	σ_m , МПа	μ , мм	σ_m , МПа	σ_m , МПа	σ_m , МПа		
0,159	0,626	0,635	0,173					40,418	45,321	44,423	41,093	σ_m , МПа	σ_m , МПа	σ_m , МПа	σ_m , МПа	σ_m , МПа	σ_m , МПа	σ_m , МПа	σ_m , МПа	σ_m , МПа	σ_m , МПа
70,017	68,328	67,92	69,464					70,017	92,716	131,732	0,375	63,408	61,381	182,196							
92,716	121,921	124,034	91,252					92,716	131,732	0,375	63,408	61,381	182,196								

В связи с тем, что в ходе проведенного анализа результатов численного эксперимента ни одна из представленных компоновочных схем УСС не продемонстрировала явного преимущества, был проведен дополнительный анализ для выбора предпочтительного компоновочного решения УСС геохода методом анализа иерархий (МАИ). В ходе анализа МАИ установлено, что компоновочная схема 1 наиболее полно отвечает требованиям к УСС геохода.

Было проведено исследование влияния геометрических параметров элементов для передачи тягового усилия на НДС оболочки и внутреннего кольца УСС геохода.

На предложенной ранее электронной модели УСС элементы для передачи тягового усилия выполнены в виде сплошных колец. 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 7 представлена схема к определению суммарной площади контакта сухаря S_c с кольцом для передачи тягового усилия на оболочке УСС. Суммарную площадь контакта сухарей с тяговым кольцом оболочки УСС можно определить по выражению:

$$S_c = n_c \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{D_r}{2} - b_1 \right)^2 - (R_{Г\Delta Б} + b_2)^2 \right) \cdot \frac{(\gamma_1 + \gamma_2)^\circ}{360^\circ} \right], \quad (4)$$

где γ_1 , γ_2 – углы секторов тягового кольца по крайним точкам по большему и меньшему радиусам окружностей, ограничивающим сухарь, соответственно, град;

n_c – количество сухарей, шт.

Была произведена адаптация разработанной ранее электронной геометрической модели УСС. Адаптированная модель учитывает наличие сухарей и позволяет варьировать их количество и площадь.

В результате расчета МКЭ были получены эпюры распределения эквивалентных напряжений в элементах УСС под действием заданных ранее нагрузок. На рисунке 8 представлены эпюры распределения эквивалентных напряжений в корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС при 12-ти сухарях с варьированием их площади.

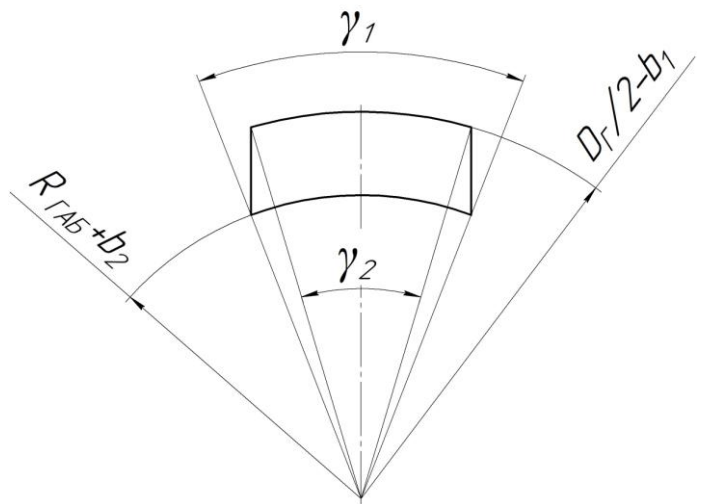


Рисунок 7 – Схема к определению площади контакта сухаря с тяговым кольцом оболочки УСС

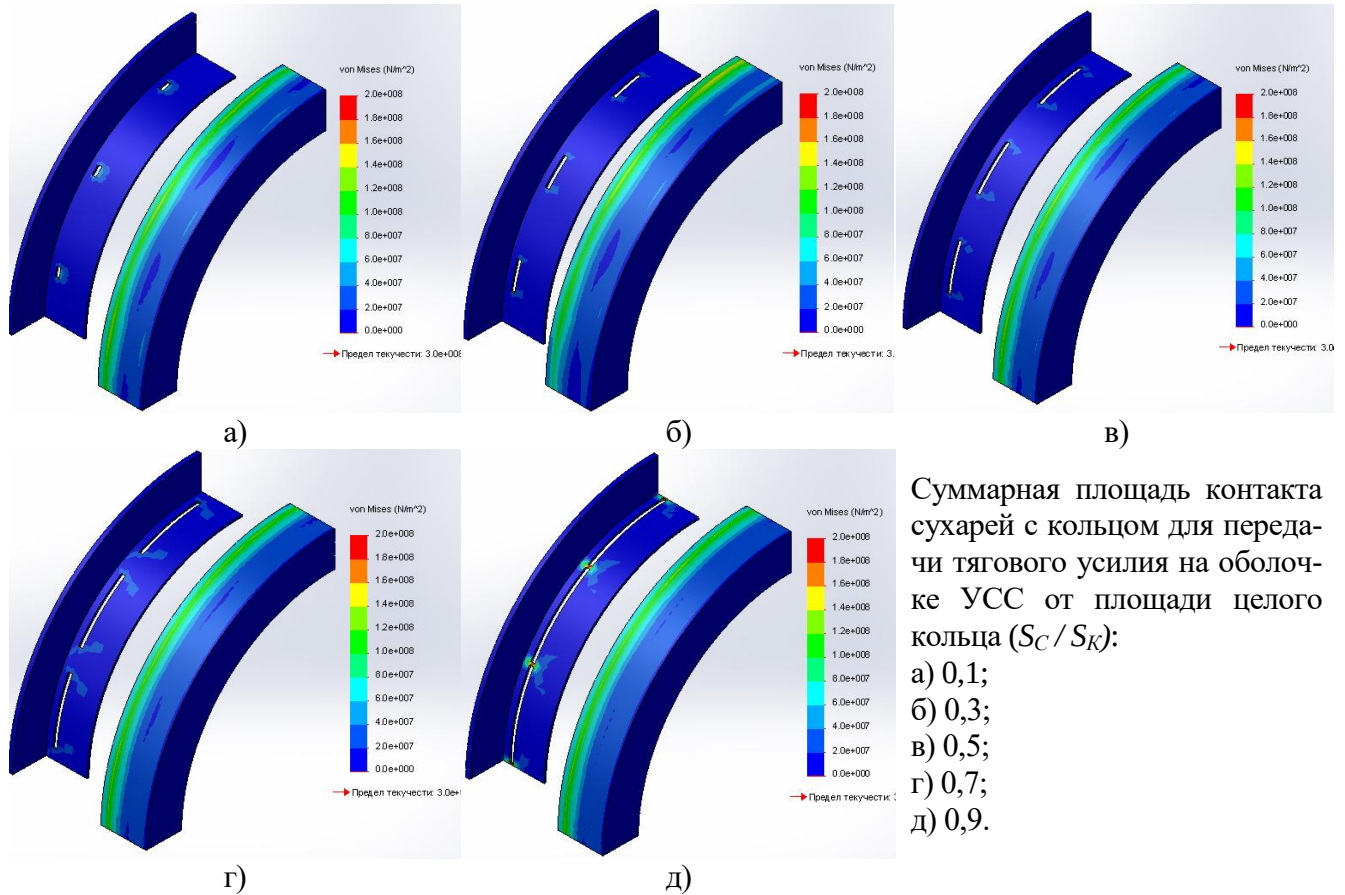


Рисунок 8 – Эпюры распределения эквивалентных напряжений в корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС при 12-ти сухарях (сухари не показаны)

Результаты численного сравнительного эксперимента по исследованию НДС корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС при изменении геометрических параметров сухарей представлены в таблице 5. На основе полученных данных 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 (рисунок 9).

Установлено, что 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 в диапазоне 39 - 42% от площади целого кольца.

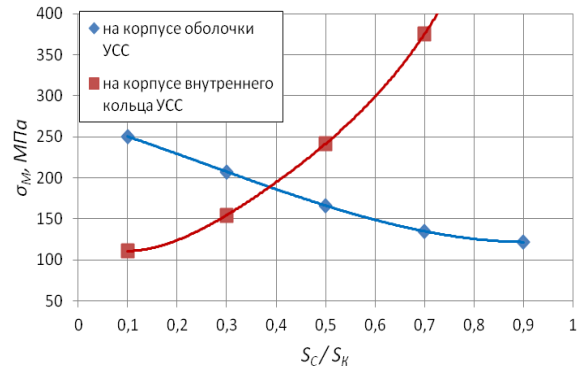
График зависимости значений напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС, при которых выполняется требование равнопрочности элементов УСС $\sigma_{равн.}$, от количества сухарей представлен на рисунке 10.

Анализ зависимости на рисунке 10 показывает, что увеличение количества сухарей в диапазоне от 4-х до 20-ти штук 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. Таким образом, 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.

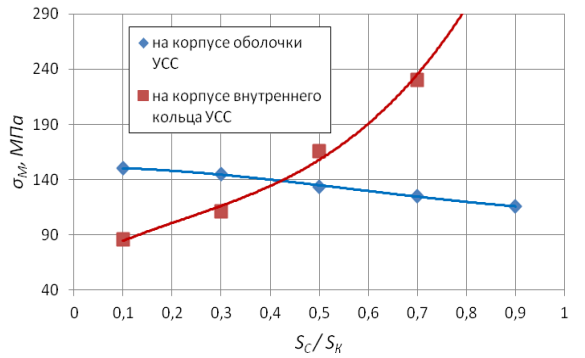
Таблица 5 – Результаты численного сравнительного эксперимента по исследованию НДС корпусов оболочки и внутреннего кольца УСС при изменении геометрических параметров сухарей

Варьируемые параметры:		Максимальные значения эквивалентных напряжений на корпусах	
n_C , шт	S_C / S_K	оболочки УСС, МПа	внутреннего кольца УСС, МПа
4	0,1	250,321	110,751
	0,3	207,325	154,520
	0,5	166,354	241,514
	0,7	134,751	375,320
	0,9	121,758	649,027
8	0,1	150,241	85,962
	0,3	145,254	111,145
	0,5	133,790	165,710
	0,7	125,441	230,321
	0,9	115,715	375,720
12	0,1	122,128	92,150
	0,3	120,520	105,024
	0,5	118,304	142,214
	0,7	114,398	198,578
	0,9	106,703	270,002
16	0,1	112,214	87,180
	0,3	110,247	98,213
	0,5	109,143	119,247
	0,7	105,294	149,140
	0,9	102,625	190,276
20	0,1	104,319	84,879
	0,3	102,515	93,894
	0,5	101,025	108,987
	0,7	99,241	128,502
	0,9	97,458	150,541

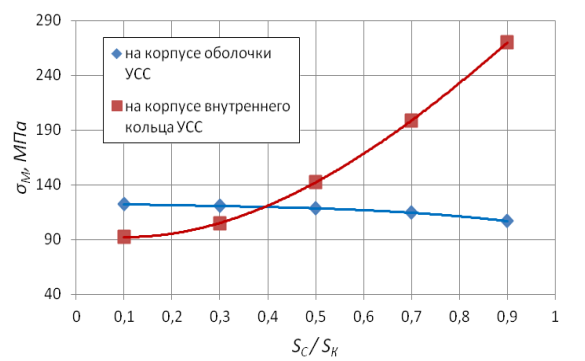
при 4 сухарях



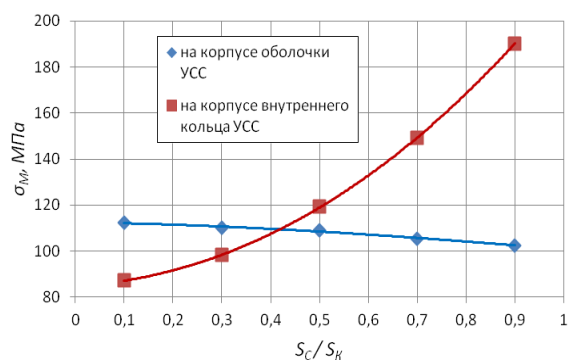
при 8 сухарях



при 12 сухарях



при 16 сухарях



при 20 сухарях

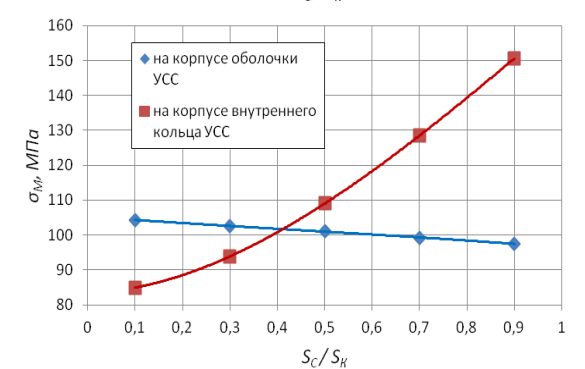


Рисунок 9 – Зависимости максимальных эквивалентных напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС от S_C / S_K

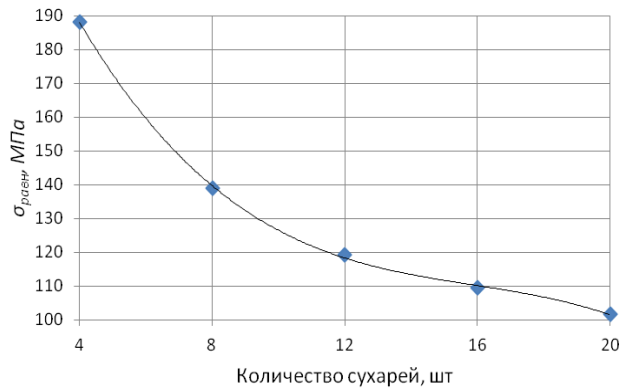


Рисунок 10 – Зависимость значений напряжений на корпусах оболочки и внутреннего кольца УСС, при которых выполняется требование равнопрочности элементов УСС, от количества сухарей

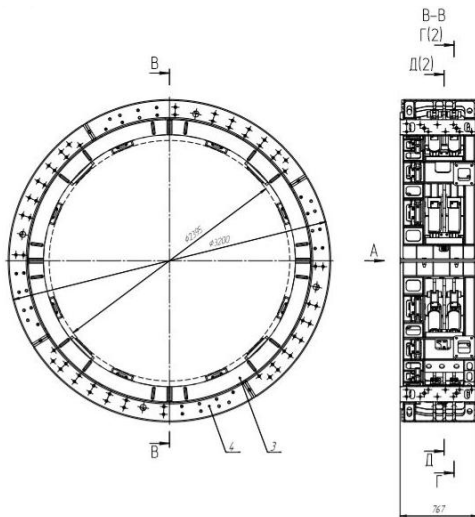


Рисунок 11 – Фрагмент сборочного чертежа УСС опытного образца геолода диаметром 3,2 м



Рисунок 12 – УСС опытного образца геолода диаметром 3,2 м

Заключение

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

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Определены особенности работы геолода и сформированы требования к УСС геолода, основными из которых являются:
 конструкция УСС должна:
 - обеспечивать минимальное значение силы воздействия движителя геолода на породу контура выработки за ним;
 - обеспечивать непрерывность перемещения геолода на забой;
 - обеспечивать работу геолода при любых углах наклона проводимой выработки;
 - быть ремонтпригодной и обеспечивать простоту монтажно-демонтажных 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 $M_{БР}$ больше на величину от 2% до 4%, сила взаимодействия между вращающейся и не вращающейся частями корпуса геохода $F_{ВЗ}$ меньше на величину от 5% до 7% и реакция геосреды на внешний движитель геохода $R_{ВД}$ 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 головной 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 напряженно-деформированное 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 внутреннем кольце 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.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих научных трудах:

Статьи в изданиях рекомендованных ВАК:

1. 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.
2. 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 КузГТУ. – 2018– № 2(126). – С. 173-182.
3. 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.

Статьи в прочих изданиях:

4. Дронов, А.А. Обоснование необходимости разработки узла сопряжения секций геохода / А.А. Дронов // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных / Томск: Изд-во ТПУ, 2013 - Т. 2 - С. 313-314.
5. Дронов, А.А. Обзор опорно-поворотных устройств горной и строительной техники в целях создания узла сопряжения секций геохода / А.А. Дронов, М.Ю. Блащук // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: труды Международной научно-практической конференции / Кемерово: «Экспо-Сибирь», 2013 - С. 97-100.
6. 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: труды Международной научно-практической конференции / Кемерово: «Экспо-Сибирь», 2014 - С. 104-106.
7. Blaschuk M.Yu. Geokhod Propel Effort Mathematical Model / M.Yu. Blaschuk, A.A. Dronov, D.A. Miheev // Applied Mechanics and Materials B. 770 (2015) C. 391-396.
8. Blaschuk M.Yu. Calculation Of Free Interior Dimensions In Geokhod Transmission With Hydraulic Cylinders / M.Yu. Blaschuk, A.A. Dronov, S.S. Ganovichev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering B. 127 (2016) C. 012033.
9. Blaschuk M.Yu. Calculation Of Geometrical Parameters Of Geokhod Transmission With Hydraulic Cylinders / M.Yu. Blaschuk, A.A. Dronov, S.S. Ganovichev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering B. 142 (2016) C. 012128.
10. Blaschuk M.Yu. Kinematic Parameters of Rotary Transmission with Hydraulic Cylinders / M.Yu. Blaschuk, A.A. Dronov, A.V. Koperchuk, R.V. Chernukhin, V.V. Litvinenko // E3S Web of Conferences B. 15 (2017) C. 03003.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

- [1], [6] – формирование требований к узлу сопряжения секций геохода;
- [2], [3], [7], [8], [9], [10] – разработка расчетной схемы, вывод аналитических выражений для определения усилий, действующих на геоход во время его перемещения;
- [4] – анализ конструктивных решений винтоповоротных проходческих агрегатов.

Подписано к печати 03.07.2020г. Формат 64х84/16

Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 468.

Отпечатано в ООО «Медиасфера». г. Юрга, Ленинградская,4. Тел. 8(38451) 5-44-33