

На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized capital letter 'А' followed by a series of loops and a final horizontal stroke.

Ефременков Андрей Борисович

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ГЕОХОДА

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Кемерово – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева»

|                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Научный консультант:                                              | доктор технических наук, заведующий лабораторией подземной робототехники<br>ФИЦ УУХ СО РАН<br><b>Аксенов Владимир Валерьевич</b>                                                                                                                                                     |
| Официальные оппоненты:<br><b>Хазанович<br/>Григорий Шнеерович</b> | доктор технических наук, профессор,<br>Шахтинский институт (филиал) ФГБОУ ВПО<br>«Южно-Российский государственный<br>политехнический университет (НПИ)<br>имени М.И. Платова», кафедра «Технология<br>и комплексы горных, строительных<br>и металлургических производств», профессор |
| <b>Юнгмейстер<br/>Дмитрий Алексеевич</b>                          | доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО<br>«Санкт-Петербургский горный университет»<br>(г. Санкт-Петербург), кафедра «Машиностроения»,<br>профессор                                                                                                                              |
| <b>Лагунова<br/>Юлия Андреевна</b>                                | доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО<br>«Уральский государственный горный университет»<br>(г. Екатеринбург), кафедра «Горные машины<br>и комплексы», профессор                                                                                                                |
| Ведущая организация:                                              | Федеральное государственное автономное<br>образовательное учреждение<br>высшего образования «Национальный<br>исследовательский технологический университет<br>«МИСиС» (г. Москва)                                                                                                    |

Защита состоится «29» сентября 2016 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Факс (3842) 58-33-80, e-mail: [siyu.eav@kuzstu.ru](mailto:siyu.eav@kuzstu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2016/ef/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Семькина Ирина Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В последние годы объемы освоения подземного пространства, странами международного сообщества, включая Российскую Федерацию, имеют тенденцию к постоянному увеличению. Сооружение капитальных подземных выработок горнодобывающих предприятий, магистралей и тоннелей метро – дорогостоящий процесс.

Традиционное представление проходки выработки, как процесса образования полости в массиве горных пород, всегда определяло и до сих пор определяет направления совершенствования геотехнологий строительства подземных сооружений и, соответственно, создания проходческого оборудования для освоения подземного пространства. В то же время, известные технологии проведения горных выработок, развиваясь по пути увеличения мощности и металлоемкости оборудования, практически исчерпали свои возможности в увеличении производительности, обеспечении безопасности работ и расширения области применения.

Дальнейшее развитие работ в области геотехнологий и геотехники может идти по двум направлениям: первое, – модернизация существующего горно-шахтного оборудования и его совершенствование путем создания систем нового технического уровня и второе, – поиск и создание принципиально нового, альтернативного инструментария (технологий и геотехники) для освоения недр и формирования подземного пространства.

Зарубежные фирмы ведут активный поиск по созданию новых технологий проведения горных выработок и формирования подземного пространства, а также созданию геотехники, способной проходить подземные выработки в любом направлении и создавать достаточное напорное усилие на исполнительном органе для разрушения горных пород.

Разработка новых технологий проходки горных выработок является одним из приоритетных критически важным для государства направлений развития науки и техники Российской Федерации.

В поисках путей совершенствования геотехнологий проведения горных выработок в ИУУ СО РАН ныне (ФИЦ УУХ СО РАН) и НИ ТПУ были рассмотрены альтернативные подходы и решения, используемые, в частности, в самолетостроении и кораблестроении. Как известно, в этих областях используются результаты исследований, в основу которых положен процесс изучения движения твердого тела соответственно в воздушной и водной средах.

В настоящее время ведутся работы по созданию опытных образцов нового класса горнопроходческих машин – геоходов, в основу которых положен принцип использования геосреды для создания силы тяги и напорных усилий у проходческого агрегата. Отсутствие научных основ создания систем нового класса горных машин, не только сдерживает процесс разработки опытных образцов геоходов, но и является **актуальной научной проблемой** в области горного машиностроения и проведения подземных выработок различного назначения и пространственного расположения.

### Степень разработанности

Проблемами создания нового вида горнопроходческой техники – винтоповоротных проходческих агрегатов (ВПА) занимались Эллер А.Ф., Аксенов В.В., Нагорный В.Д., Горбунов В.Ф. При создании концептуальной модели ВПА за основу был применен принцип совмещения основных функциональных элементов для комплексной механизации проведения выработок, сформулированный на основе функционально-

структурной систематизации подземных проходческих машин. Однако в этих работах не проводились исследования по разработке систем геохода и лишь частично затрагивались вопросы взаимодействия ВПА с геосредой.

**Целью работы является** разработка научных основ создания систем геохода как базового средства комплексной механизации проведения горных выработок и строительства подземных сооружений.

**Основная идея работы** состоит в том, что вовлечение в технологический процесс проведения горных выработок приконтурной части массива горных пород в качестве опорного звена проходческого агрегата приводит к совмещению основных операций во времени, и обеспечивает взаимное соответствие силовых параметров важнейших частей оборудования.

**Задачи исследований:**

1. Сформировать подход по созданию геоходов и разработать математическую модель взаимодействия геохода с геосредой.
2. Разработать модель и исследовать закономерности движения геохода в выработке.
3. Разработать модель взаимодействия ножевого исполнительного органа с геосредой и исследовать влияние различных факторов на его силовые параметры.
4. Обосновать параметры поверхности взаимодействия исполнительного органа геохода с породой забоя.
5. Разработать схемные решения трансмиссии геохода и математическую модель взаимодействия её элементов.
6. Разработать схемные и конструктивные решения, обосновать параметры опытного образца геохода диаметром 3,2 метра.

**Методология**, примененная при подготовке настоящей научно-квалификационной работы, заключалась в использовании принципов, приемов и подходов Советской и Российской научной школы горного машиностроения, определивших использование следующего комплекса методов исследований:

- анализ и научное обобщение опыта разработки горнопроходческого оборудования с элементами системного анализа сложных, многофункциональных объектов;
- методы теории механического разрушения горных пород и теории резания грунтов;
- методы геомеханики при обосновании моделей внешних воздействий на рабочих элементах геохода, непосредственно во время его работы в различных условиях проведения выработки;
- методы строительной механики, машиноведения и динамики машин в расчетах конструктивных и прочностных параметров элементов системы геохода;
- экспериментальные методы исследования и анализ полученных результатов.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Использование приконтурной части массива горных пород в качестве базового (замыкающего) звена создает взаимную обусловленность режимных, силовых и прочностных параметров различных рабочих органов геохода. Математическая модель взаимодействия геохода с геосредой, учитывающая особенности функционально-компоновочной схемы геохода, параметры геосреды и горнотехнические факторы проведения выработки, позволяет определять основные силовые параметры.
2. Согласно модели изменения радиуса выработки и в зависимости от радиуса оболочки находящегося в ней геохода, а также нарушений его цилиндричности,

заклинивание геوخода и появление «отрицательной» величины зазора маловероятно, а для деформированной оболочки геوخода вероятность еще меньше.

3. Модель взаимодействия ножевого исполнительного геوخода с геосредой, учитывающая функционально-компоновочную схему геوخода, параметры геوخода и геосреды, позволяет определять силовые и геометрические параметры различных конструктивных решений ножевых исполнительных органов геوخода. Геометрические параметры ножевого исполнительного органа геوخода определяются геликоидной формой поверхности забоя, параметры которой зависят от параметров внешнего движителя и диаметра геوخода, и являются различными для каждого размера геохода.

4. Значения главных напряжений в породе в точке забоя геохода зависят от отношения радиальной координаты точки к шагу винтовой линии движителя, причем зависимость НДС от расстояния до оси выработки в центральной области забоя проявляется сильнее, чем в периферийной области, а размер центральной области зависит от шага движителя геохода.

5. Полученные в результате математического моделирования значения фоновых напряжений, создаваемых суммарным воздействием ИО на породу забоя при их смещении в сторону растяжения, создают предпосылки к снижению удельной энергоёмкости процесса разрушения породы и снижению требований к мощности привода ИО. Применение распределенных нагрузок, эквивалентных суммарному действию от отдельных резцов, обеспечивает достоверность определения значений фоновых напряжений.

6. Рациональная форма образующей забоя обеспечивает контролируемое смещение главных напряжений в породе забоя, причем увеличение угла между образующей забоя и фронтальной плоскостью выработки приводит к смещению напряжений в сторону растяжения, а влияние угла наклона образующей в центральной области забоя проявляется сильнее, чем в периферийной области. Формирование забоя, выступающего внутрь выработки, является предпочтительным.

7. В схемах трансмиссии с гидроприводом непрерывность вращения головной секции обеспечивается работой гидроцилиндров в многофазных схемах, при этом количество гидроцилиндров, совершающих рабочий ход должно быть равно или больше количества гидроцилиндров, совершающих обратный ход, а число групп гидроцилиндров в многофазных схемах должно быть кратно общему количеству гидроцилиндров в трансмиссии.

**Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечиваются:**

- использованием обширного опыта и апробированных результатов создания технологий и оборудования проходки горных выработок;
- привлечением фундаментальных моделей геомеханики для выбора исходных условий, допущений и расчетных схем;
- применением строгих методов математики и механики при исследованиях и расчетах;
- использованием корректных теоретических положений строительной механики, сопротивления материалов, машиноведения и динамики машин, а также теории разрушения горных пород и резания грунтов.

Достоверность подтверждается положительными результатами предварительных испытаний базовых систем геохода модели 401, выполненных в рамках договора, заключенного на условиях открытого конкурса Министерства образования и науки РФ по реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 218.

### **Научная новизна работы:**

- разработан новый подхода к созданию проходческой техники, вовлекающей геосреду в процесс её движения;
- разработана математическая модель взаимодействия геохода с геосредой, учитывающая особенности функционально-компоновочной схемы геохода, параметры геосреды и горнотехнические факторы проведения выработки;
- разработана модель взаимодействия ножевого исполнительного органа с геосредой и установлено влияние различных факторов на его силовые и конструктивные параметры;
- разработана рациональная форма образующей забоя, обеспечивающая контролируемое смещение главных напряжений в породе забоя в сторону растяжения;
- установлено условие непрерывности вращения головной секции геохода при использовании гидроцилиндров перемещения.

### **Практическое значение работы.** Результаты работы позволяют:

- производить проектирование систем геоходов для различных горнотехнических условий и типоразмеров машин;
- создавать новые рабочие программы для обучения студентов по направлению подготовки, связанного с проектированием горных машин;
- научным и проектным организациям разрабатывать новые технологии строительства подземных выработок;
- промышленным предприятиям, занимающимся выпуском горнопроходческой техники, значительно расширить номенклатуру выпускаемых изделий.

### **Личный вклад автора состоит в:**

- формировании нового подхода к созданию проходческой техники, вовлекающий геосреду в процесс движения машины, разработке математической модели взаимодействия геохода с геосредой;
- разработке модели движения геохода в выработке, исследовании закономерностей, возникающих в процессе проведения горных выработок с использованием геохода;
- разработке модели взаимодействия ножевого исполнительного органа с геосредой, исследовании влияния различных факторов на силовые параметры исполнительного органа геохода;
- установлении рациональной формы образующей забоя, обеспечивающей контролируемое смещение главных напряжений в породе забоя в сторону растяжения;
- разработке схемных решений трансмиссии геохода и математической модели взаимодействия её элементов;
- разработке схемных и конструктивных решений, обосновании параметров опытного образца геохода модели 401 диаметром 3,2 метра.

### **Реализация результатов работы.**

Полученные результаты работы были использованы при разработке и изготовлении опытного образца геохода диаметром 3,2 метра на предприятии ОАО «КОРМЗ» (город Кемерово). Разработка и изготовление выполнены в рамках комплексного проекта «Создание и постановка на производство нового вида щитовых проходческих агрегатов многоцелевого назначения – геоходов» (договор № 02.G25.31.0076 от 23.05.2013 г.).

**Апробация работы.** Основное содержание работы, а также отдельные её положения докладывались и обсуждались на международных научных конференциях в Национальном горном университете (Украина, г. Днепропетровск 2008–2012 гг.); Донецком национальном техническом университете (2009 г.); Ляонинском техническом Университете (Китай, г. Шеньян, 2009 г.); международной научно-практической конференции

«Перспективы развития Восточного Донбасса» (г. Новочеркасск, 2008 г.); международной школе-семинаре для магистров, аспирантов и молодых ученых посвященной памяти профессора Хорста Герольда, (Казахстан, г. Усть-Каменогорск 2009 г.); международном форуме по стратегическим технологиям (IFOST Китай, г. Харбин 2011 г., г. Томск 2012 г.); международной научно-практической конференции «Рудник будущего: проекты, технологии, оборудование» (г. Пермь, 2012 г.); международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России» (2010 г.); на научных конференциях КузГТУ (г. Кемерово, 2009–2012 гг.), международных научно-практических конференциях «Перспективы инновационного развития угольных регионов России», (г. Прокопьевск, 2014–2016 гг.); на международных научно-практических конференциях «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» (г. Юрга, 2008–2015 гг.); международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (г. Москва, 2007–2016 гг.).

Результаты работы экспонировались на выставках и получили награды: «Большая золотая медаль» Международной выставки «Masheх Siberia/Машекс Сибирь 2014» (г. Новосибирск, 2014 г.); диплом I степени конкурса лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года (г. Санкт-Петербург, 2014 г.); дипломом X Международного салона «Комплексная безопасность 2015», (г. Москва, 2015 г., ВВЦ); диплом Международного конкурса Национальная безопасность 2015; диплом к медали «Гарантия качества и безопасности» (г. Москва, 2015 г.); диплом Международного военно-технического форума «Армия 2015» (г. Москва, 2015 г.); диплом IX Международного салона «Комплексная безопасность – 2016» (г. Москва, 2016 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 74 научных изданиях, включая 3 патента на изобретение, в том числе 42 статья – в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 статья в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, изложенных на 314 страницах машинописного текста, и содержит 208 рисунков, 39 таблиц, список литературы из 157 наименований и 3 приложений на 3 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** приведены объёмы международного и российского рынков подземного строительства, дана перспектива развития этих рынков. Отдельно проведена оценка существующих и перспективных планов развития строительства метро в крупнейших городах Российской Федерации, проведено сравнение подготовительных работ всего и проведенных комбайновым способом. Приведены физико-механические свойства горных пород на основе угленосных районов Кузбасского бассейна.

Рассмотрены технические характеристики и особенности работы горнопроходческих систем (ГПС) для механизированной проходки: проходческие комбайны и щиты различных производителей. Проанализированы схема взаимодействия трехсекционного ВПА с геосредой, особенности и технические характеристики винтоповоротных агрегатов на примере ВПА «ЭЛАНГ-3» и «ЭЛАНГ-4». Рассмотрены исполнительные органы и варианты трансмиссий традиционных горнопроходческих систем и ВПА.

Проведён анализ существующих САЕ систем для автоматизированного решения инженерных задач и расчетов.

Разработке и усовершенствованию горно-проходческого оборудования посвящены работы: Н.С. Гудилина, Л.И. Чугреева, Я.И. Базера, Б.С. Евсеева, Г.Н. Архипова, В.Х. Клорикьяна, В.В. Ходоша, Л.Е. Маметьева, В.П. Горячкина, А.Н. Зеленина,

В.И. Баловнева, Ю.А. Ветрова, Г.Ш., Хазановича, В.М. Скороходова, Ю.Д. Григоренко, Э.Ю. Вороновой, В.И. Нестерова, А.А. Хорешка, Б.Л. Герики, В.В. Аксенова, Н.Б. Пушкиной, В.Ю. Садовца и др.

Разработке и совершенствованию геовинчестерной технологии ВПА посвящены работы А.Ф. Эллера, В.В. Аксенова, В.Ф. Горбунова, В.Д. Нагорного и др.

Установлено, что строительство подземных сооружений различного назначения за рубежом и в Российской Федерации имеет тенденцию к значительному росту.

Физико-механические свойства горных пород сильно разнятся в различных районах их залегания, однако превышение в 8–30 раз значения предела прочности горной породы на одноосное сжатие над пределом прочности на растяжение является постоянным. Поэтому при определении схем резания породы исполнительными органами (ИО) горных машин, удельная энергоемкость разрушения породы растягивающими нагрузками ожидаемо будет меньше, чем сжимающими. Это приведёт к значительному снижению энергоемкости процесса разрушения горной породы.

Проходческие комбайны и проходческие щиты накопили в своем развитии ряд существенных недостатков: создание тяговых и напорных усилий происходит за счет массы проходческого оборудования; большая металлоемкость оборудования; ограниченность применения по углам наклона проводимой выработки; для проходческих комбайнов проблемой является обеспечение безопасного ведения работ в призабойной зоне.

**Во второй главе** рассмотрены и выявлены проблемы работы современных ГПС: невозможность движения в любом направлении, ограничения по напорным усилиям на ИО (для увеличения напорного усилия необходимо увеличивать вес машины).

В дальнейшем нами предлагается рассматривать механизированную проходку как процесс движения твердого тела (оборудования) в твердой среде (геосреде); а приконтурный массив пород использовать для опоры и создания тягового и напорного усилий. Для этого используется **геоход** – аппарат, движущийся в породном массиве с использованием геосреды. Представляя собой новый класс горных машин, геоход предназначен для проходки подземных выработок различного назначения и расположения в пространстве, **аналогов конструкции в мировой практике нет.**

Описаны особенности работы геохода, в соответствии с которыми разработаны требования к его основным системам:

Требования к геоходу и его корпусу:

– возможность полного совмещения во времени всех операций проходческого цикла;

– возможность маневрирования и перемещения в любом направлении;

– монтаж всех функциональных систем на одной конструктивной базе;

– низкая металлоемкость при достаточной прочности;

– независимость развиваемых усилий от веса машины.

– способность воспринимать и распределять на окружающую геосреду нагрузки от силового оборудования и исполнительных механизмов;

Требования к трансмиссии и модулю сопряжения:

– соединять секции с возможностью их взаимного вращения;

– передавать вращающий момент и тяговое усилие между секциями;

– оставлять свободное пространство для удаления породы и обслуживания.

Требования к исполнительному органу:

– достаточная производительность при любом угле наклона выработки;

– возможность непрерывной подачи на забой;

– разрушение забоя на полное сечение выработки за один оборот секции;



- геометрическое и силовое соответствие параметрам внешнего движителя;
- формирование и разрушение забоя с уступом;
- низкая удельная энергоемкость разрушения породы забоя;
- свободный доступ к функциональным элементам исполнительного органа.

Представлена система синтеза и анализа конструктивных и компоновочных решений методом перебора комбинаций вариативных признаков. На основании чего получено обоснованное базовое компоновочное и конструктивное решение геохода (рис. 1).

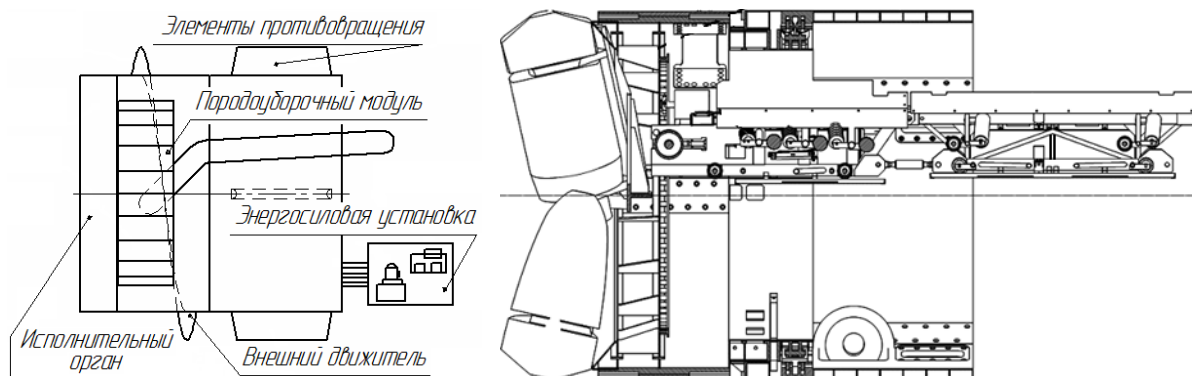


Рисунок 1 – Компоновочная схема и конструктивное решение геохода

Доработана математическая модель взаимодействия геохода с геосредой (рис. 2) и определены силовые параметры трансмиссии.

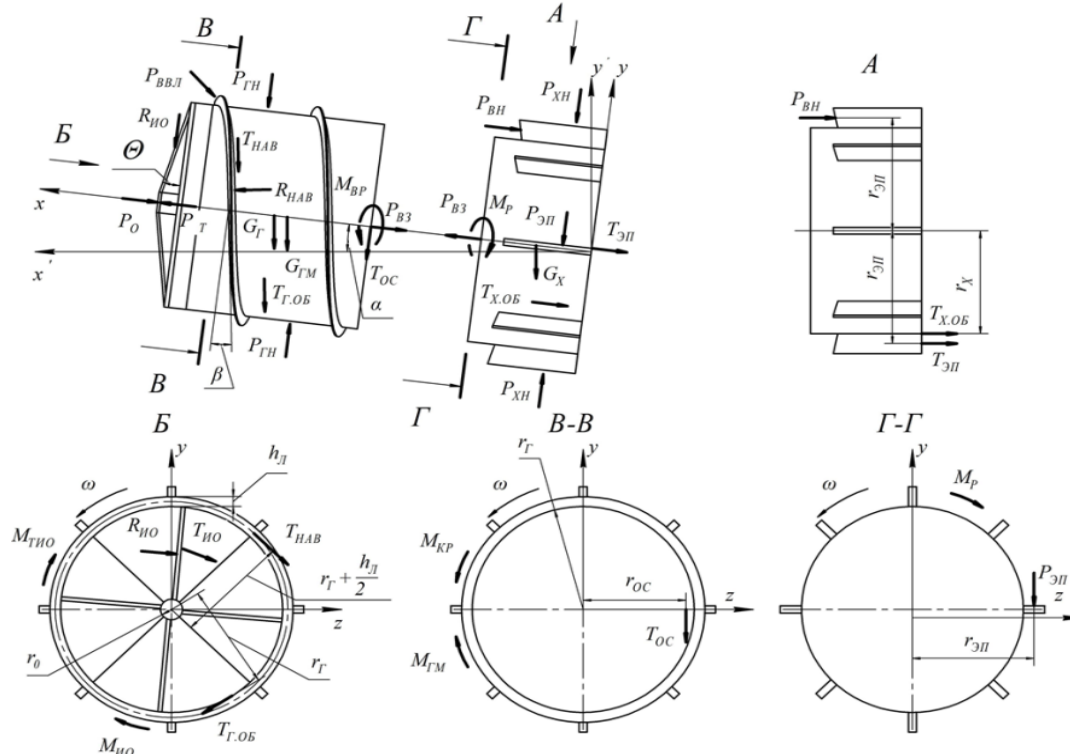


Рисунок 2 – Схема взаимодействия геохода с геосредой

где:  $P_T$  – тяговое усилие винтового движителя, Н;  $P_O$  – проекции полной силы сопротивления вмещающей породы резанию на ось вращения, Н;  $P_{ВЗ}$  – усилие взаимодействия головной и стабилизирующей секции при движении геохода, Н;  $P_{ВВЛ}$  – усилие внедрения винтовой лопасти в приконтурный массив при движении агрегата, зависящее от вида исполнительного органа установленного перед ней, Н;  $P_{ВН}$  – суммарное усилие внедрения элементов противовращения в породу, Н;  $P_{ГН}$  – нормальная составляющая нагрузок от горного давления на головную секцию, Н;  $P_{ХН}$  – нормальная составляющая

нагрузок от горного давления на стабилизирующую секцию, Н;  $P_{ЭП}$  – нормальная составляющая реактивной силы на элементах противовращения от реактивного крутящего момента, Н;  $R_{НАВ}$  – реакция пород контура выработки на винтовую лопасть, Н;  $R_{ИО}$  – проекция полной силы сопротивления пород резанию на плоскость перпендикулярную оси вращения, Н;  $T_{НАВ}$  – силы трения винтовой лопасти по вмещающей породе, Н;  $T_{Г.ОБ}$  – суммарная сила трения головной оболочки по вмещающей породе, Н;  $T_{ИО}$  – сила трения исполнительного органа по вмещающей породе, Н;  $T_{ОС}$  – суммарная сила трения качения останова, Н;  $T_{ЭП}$  – суммарная сила трения элементов противовращения о породу, Н;  $T_{Х.ОБ}$  – суммарная сила трения стабилизирующей секции о породу, Н;  $M_{ВР}$  – необходимый вращающий момент на двигателе, Н·м;  $M_{ГМ}$  – вращающий момент, необходимый для перемещения разрушенной породы из нижней части геохода вверх, Н·м;  $M_{ТИО}$  – вращающий момент сопротивления, создаваемый трением исполнительного органа по породе, Н·м;  $M_p$  – реактивный вращающий момент на стабилизирующей секции, Н·м;  $G_{Г}$  – вес головной секции, с учетом смонтированных на ней исполнительного органа, погрузочного устройства и другого оборудования, Н;  $G_{ГМ}$  – вес отбитой горной массы, находящейся внутри агрегата, Н;  $G_{Х}$  – суммарный вес стабилизирующей секции с оборудованием, Н;  $r_{Г}$  – радиус головной секции, м;  $r_{ОС}$  – радиус по середине шариков останова, элемента сопряжения секций геохода, реализующей передачу усилия взаимодействия между секциями и трение качения между секциями, м;  $r_{ЭП}$  – расстояние от оси вращения до середины элементов противовращения, м;  $r_{Х}$  – радиус стабилизирующей секции, м;  $r_0$  – радиус центрального патрубка исполнительного органа геохода, м;  $h_{Л}$  – высота винтовой лопасти, м;  $\alpha$  – угол подъема выработки, град;  $\beta$  – угол подъема винтовой лопасти, град;  $\Theta$  – средний угол между плоскостью перекрытия исполнительного органа и плоскостью, перпендикулярной оси вращения, град;  $\omega$  – угловая скорость вращения геохода, рад/с.

**В третьей главе** произведён выбор основных моделей распределения геометрических параметров геохода и выработки, рассмотрена модель распределения номинального зазора между геоходом и выработкой, распределение эксплуатационного размера выработки в том числе через оценку возникающего зазора, рассмотрены колебания корпуса геохода в выработке.

Для описания случайных по своей природе, но ограниченных технологическими нормами конструктивных параметров (здесь – диаметров машины и выработки) предлагается выбирать закон бета-распределения.

Распределение имеет значительную «правую» асимметрию, наиболее вероятны размеры, близкие к максимумам. С небольшой вероятностью возможны относительно малые размеры, существенно отличающиеся от средних параметров.

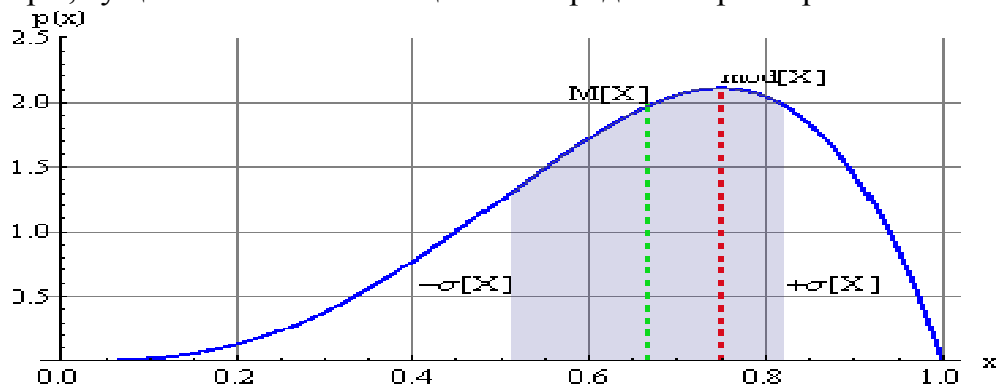


Рисунок 3 – Модельная плотность распределения исходного случайного аргумента

Модель распределения номинального зазора между геоходом и выработкой определяется случайной величины зазора  $\delta = \tilde{R} - \tilde{r}$  можно получить в соответствии с известным преобразованием

$$f(\delta) = \int p_R(R = r + \delta) \cdot p_r(r) dr. \quad (1)$$

На рисунке 4 иллюстрируется маловероятное, но учитываемое положение, которое формирует предельно опасную величину «отрицательного» зазора. По мере увеличения зазора и смещения  $P(r)$  вправо возникает перекрытие его с распределением  $P(R)$ .

Для моделирования можно считать, что  $\Delta r \equiv h_L$ , т. е. величины зазоров в дальнейших расчетах следует тоже отнести к высоте лопасти  $\delta \times h_L$  (рис. 5).

График отражает малую (около 3 %) вероятность «заклинивания» геохода выработке.

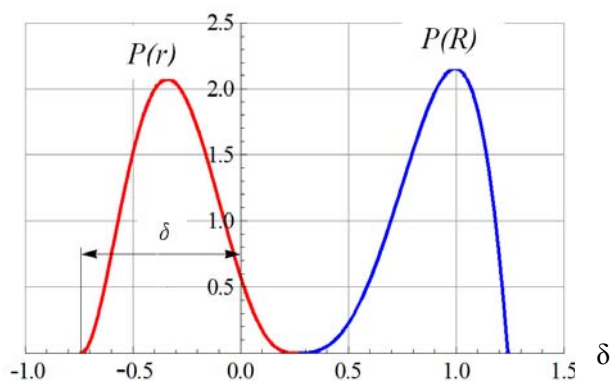


Рисунок 4 – Схема определения предельной величины зазора  $\delta = -0,74$

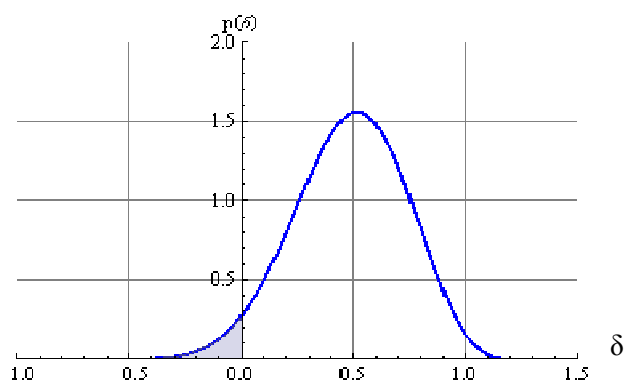


Рисунок 5 – Модель плотности распределения зазора

В процессе эксплуатации происходит изнашивание и подработка первоначального контура выработки из-за динамического взаимодействия с агрегатом. Новый параметр – эксплуатационный радиус выработки имеет ярко выраженный случайный характер и также может быть представлен законом распределения.

Модель задает тенденцию, формирующуюся в процессе эксплуатации выработки, при котором разбиваются стенки, и увеличивается зазор.

В итоговом распределении с вероятностью 65 % представлены выработки с номинальными размерами, а примерно в 35 % совокупности возможны выработки, деформированные в ходе проведения работ.

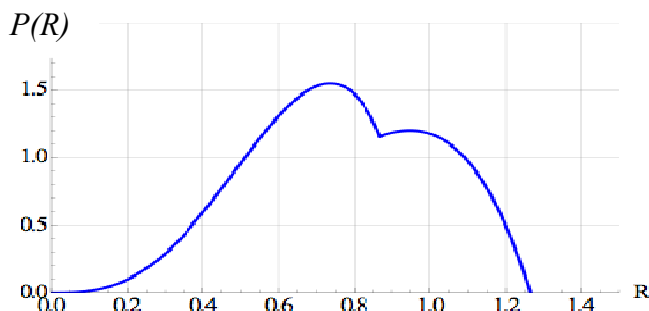


Рисунок 6 – Модель плотности распределения радиуса «деформированной» выработки

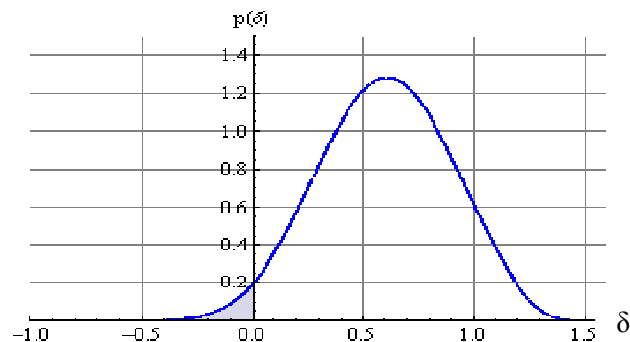


Рисунок 7 – Плотность распределения зазоров при эксплуатации

Распределение эксплуатационных зазоров смещается в направлении больших значений по сравнению с номинальной картиной. При этом уменьшается (до ~ 2%) вероятность опасного «заклинивания» агрегата в изношенных и деформированных выработках.

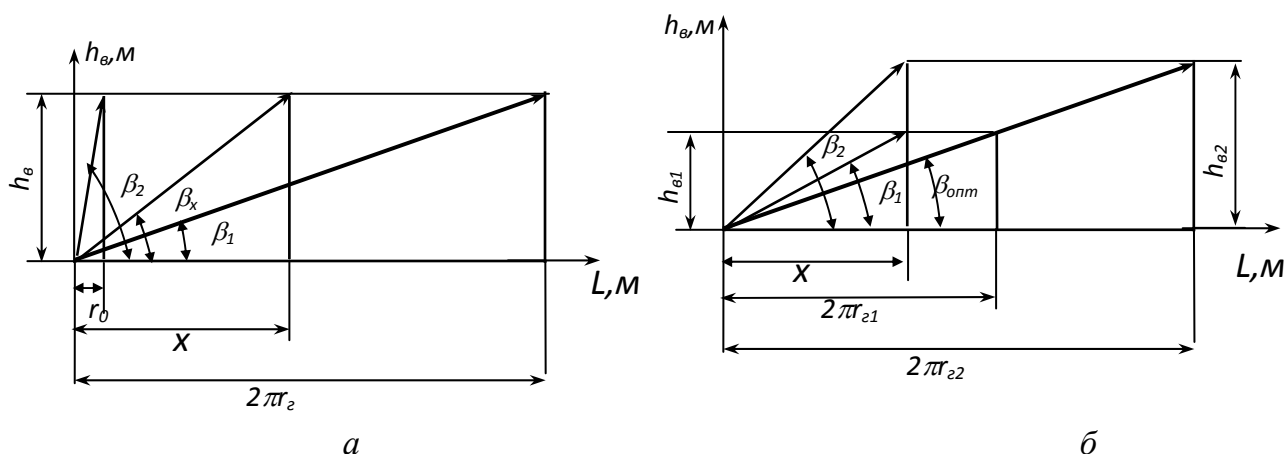
По результатам расчетов определена вероятность того, что значение зазора примет «отрицательную» величину, или того, что агрегат заклинит в выработке – при номинальном размере вероятность опасности не превышает 3 %, а в деформированной выработке уменьшается до 2 %. Также в итоговом распределении с вероятностью 65 % представлены выработки с номинальными размерами, а примерно в 35 % совокупности возможны выработки, деформированные в ходе проведения работ.

**В четвертой главе** разработана модель взаимодействия ножевого исполнительного органа геолока с геосредой, а также получены зависимости для определения силовых и геометрических параметров ножевых исполнительных органов.

Исполнительный орган геолока, имеющий сложную форму, а также характер движения агрегата в подземном пространстве обуславливают формирование поверхности забоя сложной формы с гарантированным образованием уступа. Получаемая форма поверхности забоя, зависящая от геометрических параметров ИО, представляет собой геликоидную поверхность.

Перемещаясь на забой, точки, располагающиеся на периферии ножа ИО, двигаются под меньшим углом, чем точки, располагающиеся на ноже, но ближе к оси вращения геолока (рисунок 8, а). После внедрения ножа ИО в массив, поверхность забоя на участке между следующими друг за другом радиальными ножами будет принимать вид винтовой поверхности.

При увеличении диаметра агрегата точка принадлежащая ножу ИО и располагающаяся на некотором расстоянии от центра вращения агрегата, будет за один полный оборот перемещаться на расстояние которое больше чем (рисунок 8, б). В этом случае и угол перемещения точки ножа ИО наклона будет больше чем исходный (рисунок 8, б). Следовательно, при увеличении радиуса агрегата геометрические параметры геликоидной формы ножа будут индивидуальными для каждого радиуса агрегата.



а – от расположения на радиальном ноже; б – от типоразмера геолока  
Рисунок 8 – Направление движения точек ножа ИО геолока в зависимости

Высота формируемого уступа  $h$  зависит от шага винтовой лопасти и количества радиальных ножей, установленных на ИО агрегата. Количество радиальных ножей определяет число взаимосопрягаемых участков с геликоидной поверхностью на забое.

Между двумя взаимосопрягаемыми винтовыми поверхностями образуется уступ, который постоянно формируют и разрушают ножи ИО по мере их подачи на забой

Сложная геликоидная поверхность забоя определяется только характером перемещения агрегата, поэтому винтовая поверхность образуется при работе любого радиального ИО, независимо от его конструкции и применяемого инструмента.

Расположение радиальных ножей относительно оси агрегата влияет на силы резания возникающие в процессе разрушения массива горных пород. При резании одним радиальным ножом ИО агрегата всю силу заблокированного резания можно представить в виде суммы трех составляющих сил (рисунок 9):

1. Силы для преодоления сопротивления грунта передней гранью ножа  $P_{св}$ ;
2. Силы для преодоления сопротивлений грунта разрушению в боковых расширениях прорези  $P_{бок}$ ;
3. Силы для преодоления сопротивлений грунта срезу боковыми ребрами ножа у дна прорези  $P_{бок. ср.}$ .

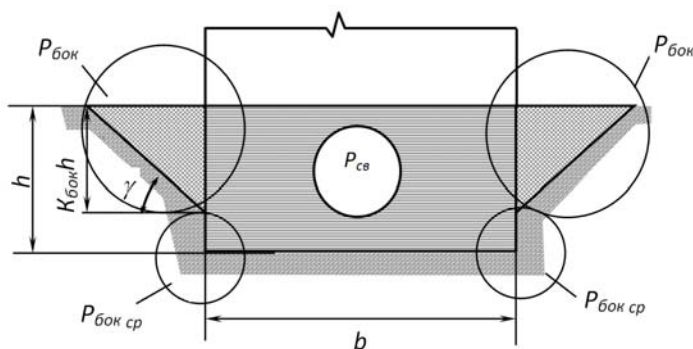


Рисунок 9 – Схема действия сил при заблокированном резе простым ножом

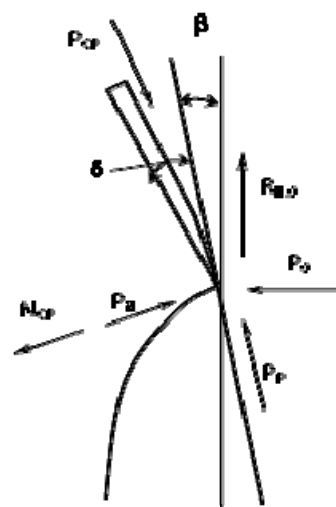


Рисунок 10 – Расчетная схема к определению полной силы сопротивления грунта резанию ножевым исполнительным органом

Основываясь на методике определения сил резания по опытным коэффициентам, получены зависимости для определения проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, независимой от ширины среза, на ось вращения агрегата и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей:

$$P_{о.бок} = \frac{h_B}{n} \left( m_{бок} \frac{h_B}{n} + m_{бок.ср} \right) \left[ - \frac{\cos(\delta + \varphi_{mp} + \beta_1) + \cos(\delta + \varphi_{mp} + \beta_2)}{\sin(\delta + \varphi_{mp})} \right]; \quad (2)$$

$$R_{у.о.бок} = \frac{h_B}{n} \left( m_{бок} \frac{h_B}{n} + m_{бок.ср} \right) \left[ \frac{\sin(\delta + \varphi_{mp} + \beta_1) + \sin(\delta + \varphi_{mp} + \beta_2)}{\sin(\delta + \varphi_{mp})} \right]; \quad (3)$$

$$M_{у.о.бок} = \frac{h_B}{n} \left( m_{бок} \frac{h_B}{n} + m_{бок.ср} \right) \left[ \frac{r_2 \sin(\delta + \varphi_{mp} + \beta_1) + r_o \sin(\delta + \varphi_{mp} + \beta_2)}{\sin(\delta + \varphi_{mp})} \right]. \quad (4)$$

Для ножевого ИО агрегата, имеющего  $n$  – ножей, полная проекция силы сопротивления грунта резанию на ось вращения агрегата и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также полный момент сопротивления резанию, соответственно, равны

$$P_o = n(P_{о.св} + P_{бок}); \quad (5)$$

$$R_{u.o} = n(R_{u.o.cв} + R_{u.o.бок}); \quad (6)$$

$$M_{u.o} = n(M_{u.o.cв} + M_{u.o.бок}). \quad (7)$$

Для исполнительного органа имеющего переменную режущую линию (ножевой ИО с зубьями) силовые зависимости будут иметь вид:

$$P_o^3 = \sum_{i=1}^{n'} p_{св_i} F_{св_i} A_i + p_{бок} \sum_{i=1}^{n'} F_{бок_i} A_i + p_{бок.ср} \sum_{i=1}^{n'} L_{бок.ср_i} A_i; \quad (8)$$

$$R_{u.o}^3 = \sum_{i=1}^{n'} p_{св_i} F_{св_i} B_i + p_{бок} \sum_{i=1}^{n'} F_{бок_i} B_i + p_{бок.ср} \sum_{i=1}^{n'} L_{бок.ср_i} B_i; \quad (9)$$

$$M_{u.o}^3 = \sum_{i=1}^{n'} p_{св_i} F_{св_i} x_i B_i + p_{бок} \sum_{i=1}^{n'} F_{бок_i} x_i B_i + p_{бок.ср} \sum_{i=1}^{n'} L_{бок.ср_i} x_i B_i, \quad (10)$$

где  $A_i = (\sin \beta_i - ctg(\delta_i + \mu) \cos \beta_i)$  и  $B_i = (\cos \beta_i + ctg(\delta_i + \mu) \sin \beta_i)$ .

Полученные силовые зависимости взаимодействия простого ножевого ИО и ИО имеющего переменную режущую кромку позволяют определять проекции составляющих сил резания на ось геохода и плоскость перпендикулярную оси геохода, а также момент сил сопротивления резанию.

Разработанная методика расчета силовых параметров ножевого ИО агрегата, базирующаяся на аналитически полученных выражениях, позволяет определять:

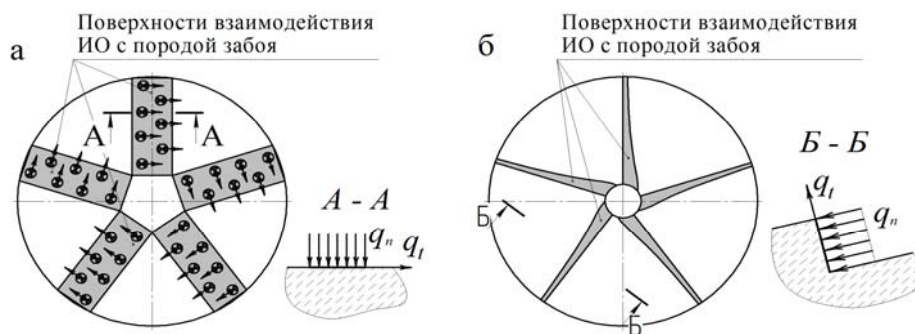
- силы резания на одном радиальном ноже ИО геохода;
- силы резания на ножевом ИО геохода для различных конструктивных решений ИО.

Модель взаимодействия ножевого ИО геохода с геосредой позволила:

- выявить связь между геометрическими параметрами винтовой линии внешнего движителя ( $h_e$  – шагом и  $\beta$  – углом наклона винтовой линии) и геометрическими параметрами ножевого ИО ( $l$  – длина радиального ножа,  $\beta_i$  – угол под которым расположена каждая  $i$ -тая точка ножа);
- выявить связь между радиальными размерами агрегата и геометрическими параметрами ножевого ИО.
- определить зависимости силовых параметров от различных типоразмеров и конструктивных исполнений ножевого ИО геохода.

**В пятой главе** разработаны схемные решения поверхности взаимодействия исполнительного органа с породой забоя (ПВ) и модель процесса взаимодействия ИО с породой, на основе которых определены актуальные параметры ПВ и их влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) породы забоя, обоснованы параметры рациональной формы ПВ.

Определено влияние уступа (рис. 11) и его параметров на НДС забоя.



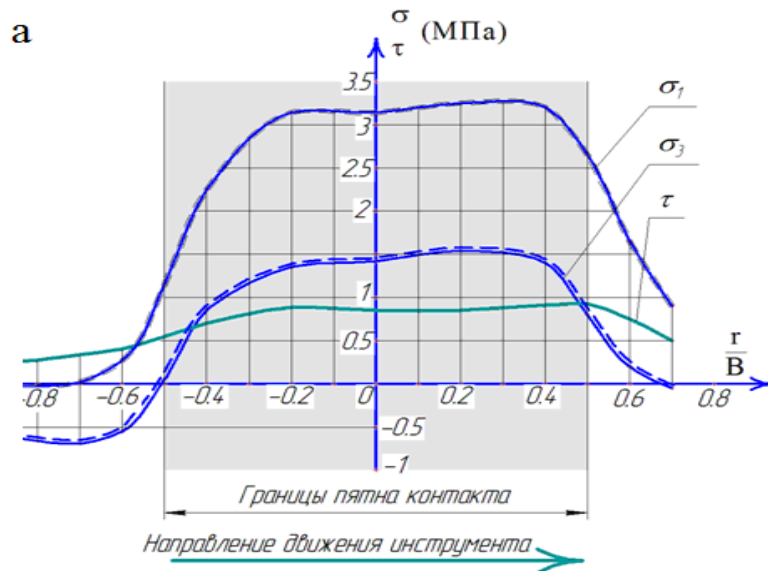
забои а) плоский, б) с уступом

Рисунок 11 – Схемы к моделям взаимодействия ИО с породой забоя



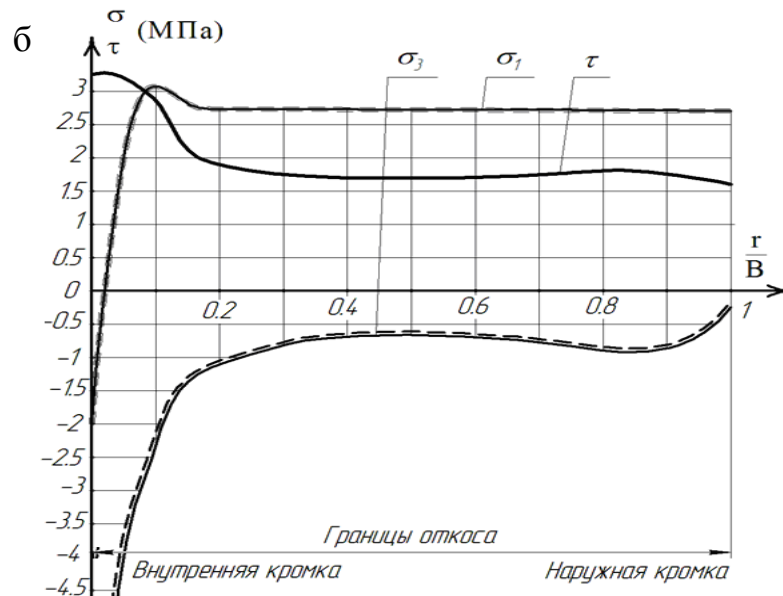
Доказано, что наличие уступа в забое приводит к смещению главных напряжений в сторону растяжения и росту касательных напряжений (рис. 12). Это создает предпосылки к снижению удельной энергоёмкости разрушения породы и делает ПВ, формирующую уступ, предпочтительной.

Исследовано влияние следующих параметров уступа на НДС породы (рис 13): угол  $\gamma$  наклона ПВ, относительная высота  $h/D$  (отношение высоты уступа к диаметру инструмента) и относительное расстояние  $l/h$  (отношение расстояния между уступами к высоте уступа).



а) ПВ, формирующая плоский забой:

$r$  – поперечная координата точки ПВ;  $B$  – ширина ПВ



б) ПВ, формирующая уступ

Рисунок 12 – Распределение главных и касательных напряжений по ширине ПВ



$l, l'$  – расстояние по линии подачи и по окружности во фронтальной плоскости;  
 $h$  – высота уступа;  $\gamma$  – угол наклона ПВ к формируемой поверхности;  
 $D$  – диаметр инструмента.

Профили ПВ а) линейный, б) цилиндрический

Рисунок 13 – Развертки цилиндрических сечений заборта с радиальными уступами

Увеличение угла  $\gamma$  приводит к смещению главных напряжений в направлении растяжения (рис. 14).

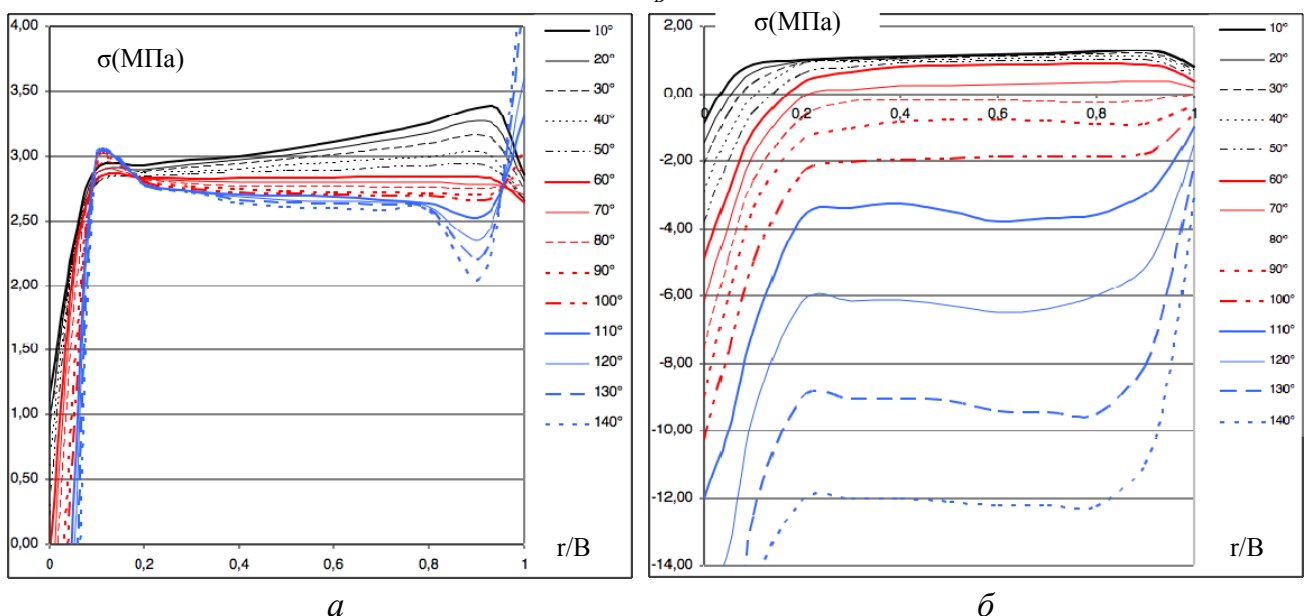
Увеличение относительной высоты уступа приводит к распространению в породе заборта растягивающих напряжений (рис. 15).

Высота уступа  $h$  и расстояние между уступами  $l$  по линии подачи определяются формулами:

$$h = \frac{h_e}{n} \cos \beta \cos \alpha \quad \text{и} \quad l = \frac{2\pi r}{n} \cos \beta, \quad (11)$$

где  $h_e$  – шаг винтовой линии движителя,  $r$  – радиальная координата,  $n$  – количество уступов,  $\beta$  – угол подъема винтовой линии.

$$\text{Относительное расстояние: } l_n = \frac{l}{n} = \frac{2\pi r}{n_B} \quad (12)$$



а)  $\sigma_1$  (МПа), б)  $\sigma_3$  (МПа)

Рисунок 14 – Распределение главных напряжений по ПВ при разных углах  $\gamma$



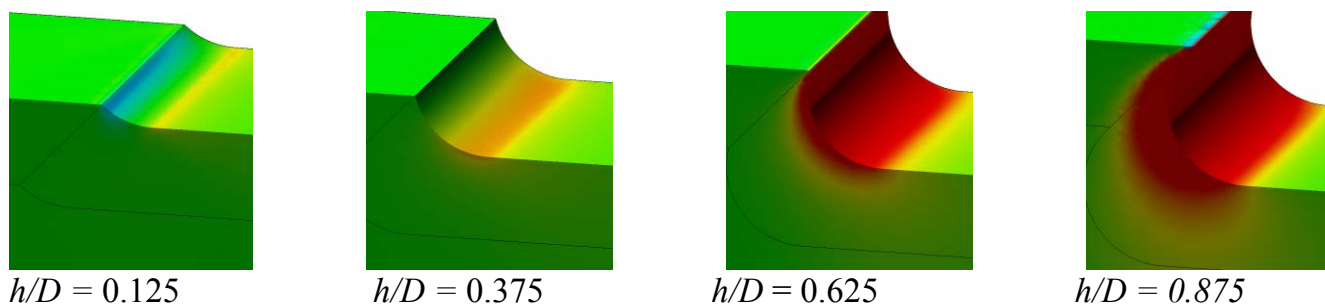


Рисунок 15 – Эпюры главных напряжений  $\sigma_3$  при относительных высотах  $h/D$

Модель для оценки влияния относительного расстояния  $l/h$  на НДС породы показана на рисунке 16.



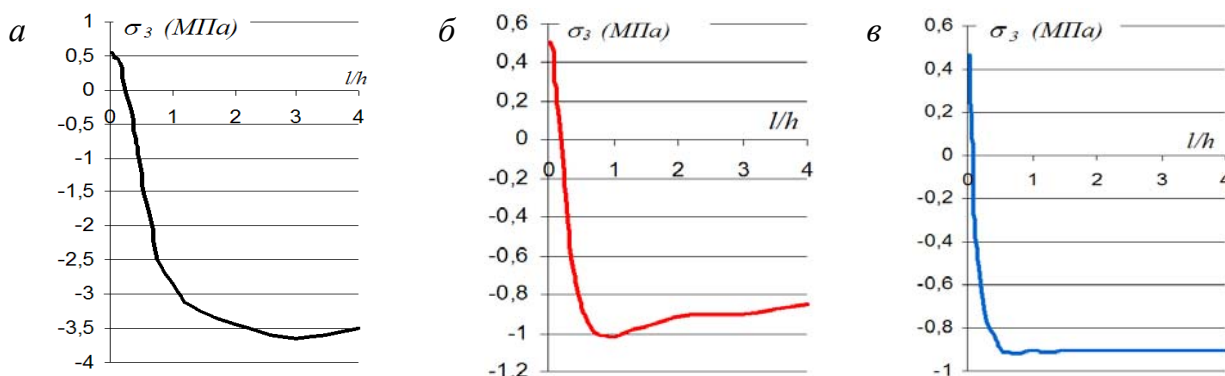
а) общий вид, б) схема приложения нагрузок

Рисунок 16 – Прямой каскад уступов с профилем, соответствующим цилиндрической развертке забоя

Отношение  $l/h$  при моделировании изменяли в диапазоне от 1/40 до 4.

При значениях  $l/h < 1.25$  ( $l/h < l_{кр}$ ) главные напряжения смещаются к сжатию, а при  $l/h > 1.25$  ( $l/h > l_{кр}$ ) зависимость носит неявный характер (рис. 17).

Относительное расстояние  $l_h$  зависит от шага движителя и радиальной координаты  $r$  и влияет на НДС породы. Это позволило определить характерные концентрические области на груди забоя (рис. 18).



а) области внутренней кромки, б) средняя часть ПВ, в) в области внешней кромки

Рисунок 17 – Графики зависимостей главных напряжений  $\sigma_3$  от относительного расстояния между уступами



Рисунок 18 – Характерные концентрические области на груди забоя

Введено понятие образующей забоя (рис. 19), обоснована её форма.

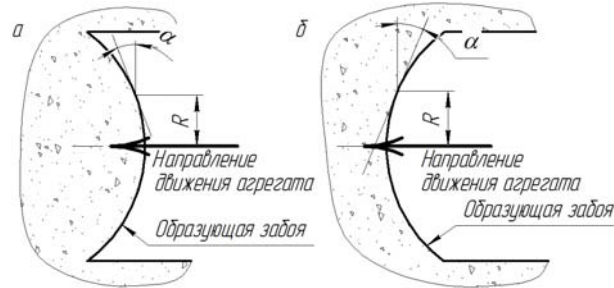


Рисунок 19 – Примеры образующих забоя

С учетом наклона образующая забоя к фронтальной плоскости под углом  $\alpha$  (рис. 19) выражения (11) принимают вид:

$$h = \frac{h_e}{n} \cos \beta \cos \alpha \quad \text{и} \quad l = \sqrt{\left(\frac{2\pi r}{n}\right)^2 - h^2} \quad (13)$$

А относительное расстояние между уступами:

$$l_h = \sqrt{\frac{h_e^2 + (2\pi r)^2}{h_e^2 \cos^2 \alpha} - 1} \quad (14)$$

При значениях параметра  $l_h > l_{hкр}$  обеспечивается смещение главных напряжений в направлении растяжения. Задавшем значением  $l_{hкр}$  получаем условие:

$$\operatorname{tg} \alpha \geq \sqrt{\frac{h_e^2 l_{hкр}^2 - (2\pi r)^2}{h_e^2 + (2\pi r)^2}} = \frac{dz}{dr} \quad (15)$$

где  $z$  и  $r$  – осевая и радиальная координаты точки образующей.

Интегральная форма выражения (15) дает уравнение линии образующей:

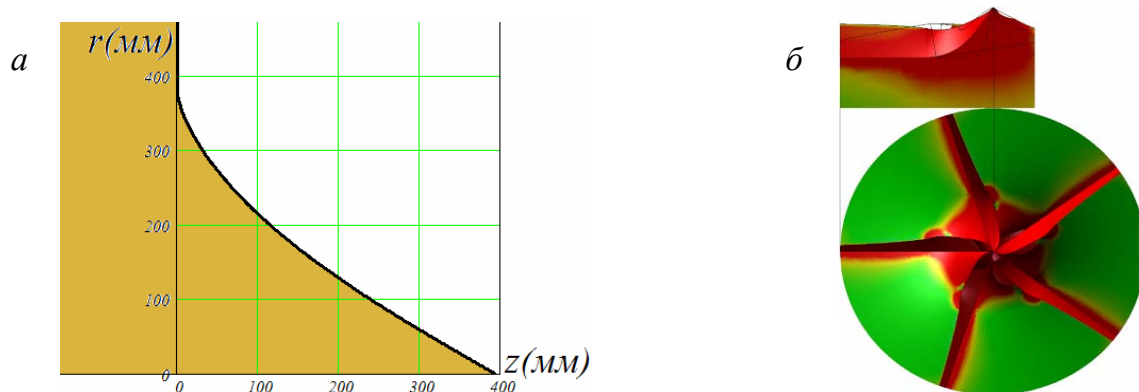
$$z(r) = \int_{r_{кр}}^r \sqrt{\frac{h_e^2 l_{hкр}^2 - (2\pi r)^2}{h_e^2 + (2\pi r)^2}} dr \quad (16)$$

Область определения выражения (16) ограничена диапазоном  $0 < |r| < \frac{h_e l_{hкр}}{2\pi}$ , при

$r > \frac{h_e l_{hкр}}{2\pi}$  угол  $\gamma$  не оказывает явного влияния на НДС породы.

Численное решение интеграла (16) позволило построить линию рациональной образующей (рис. 20, а).

Сравнение эпюр главных напряжений  $\sigma_z$  забоев с радиальными уступами (рис. 18) и с рациональной образующей (рис. 20, б) показало, что применение рациональной образующей позволило сместить главные напряжения в центральной части забоя в сторону растяжения.



а) рациональная форма образующей, б) эпюры главных напряжений  $\sigma_z$

Рисунок 20 – Модель забоя с рациональной образующей

**В шестой главе** рассмотрены возможные варианты построения трансмиссии геوخода, приведены разработанные схемные решения трансмиссии геوخода, проведен анализ на соответствие требованиям.

Построение схем трансмиссии на основе редукторов, электродвигателей и, гидромоторов затруднительно, ввиду сложности обеспечения требования снижения массогабаритных характеристик и неудовлетворительного вписывания в габариты свободного пространства внутри геохода. В наибольшей степени требованиям удовлетворяют разработанные схемные решения трансмиссии геохода с гидроцилиндрами работающими в противофазе и многофазные схемы (рис. 21), обеспечивающие непрерывное вращение головной секции и непрерывное перемещение геохода на забой. При этом наиболее эффективная работа гидроцилиндров по вкладу в развиваемый вращающий момент достигается в многофазных схемах, т. е. при наибольшем количестве гидроцилиндров совершающих рабочий ход (рис. 22).

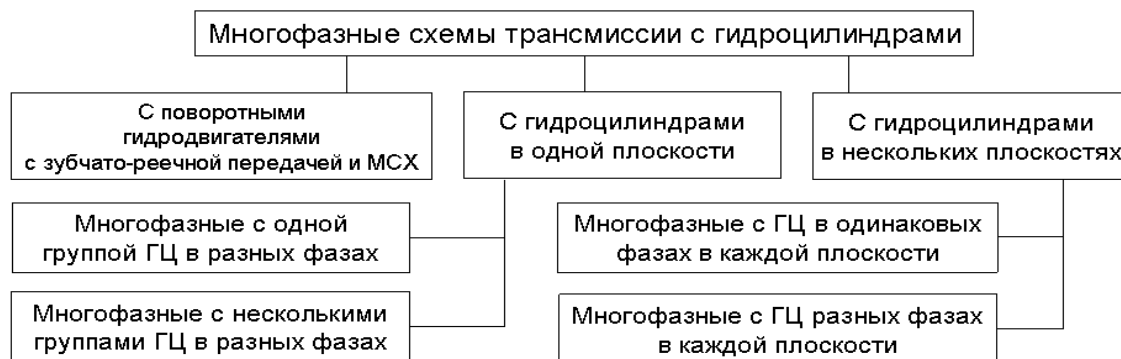


Рисунок 21 – Возможные многофазных схем трансмиссии геохода с гидроцилиндрами

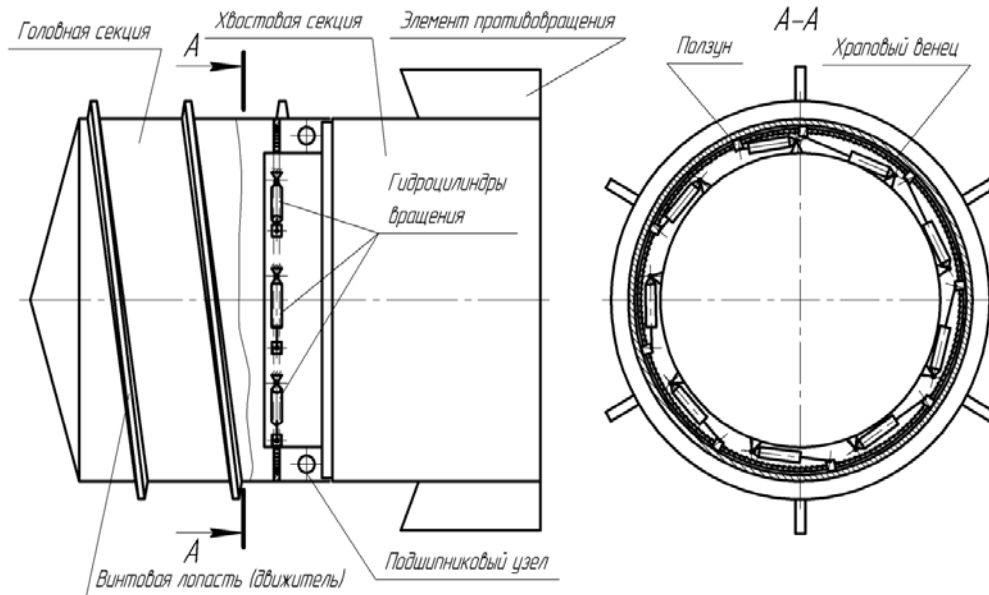


Рисунок 22 – Схема трансмиссии с непрерывным вращением головной секции с гидроцилиндрами в разных фазах выдвижения

Число фаз положений штоков должно быть целым числом, а общее количество гидроцилиндров может быть любым, начиная с трёх. Общее количество гидроцилиндров трансмиссии должно быть кратно числу гидроцилиндров, совершающих обратный ход или числу групп гидроцилиндров, находящихся в различных фазах выдвижения.

Момент, развиваемый гидроцилиндрами трансмиссии в многофазных схемах

$$M_{BP} = n_{ГР} \sum_{i=1}^{n_{РАБ,ГР}} p_{ТР} \cdot D_{УСТ,ШТ} \cdot \frac{\pi \cdot D_{П}^2}{8} \sqrt{1 - \frac{\left( \left( \frac{D_{УСТ,ШТ}}{2} \right)^2 + \left( L_0 + \frac{L_X}{n_{\PhiАЗ} - 1} \cdot (i - 1) + \delta_i \right)^2 - \left( \frac{D_{УСТ,ГЦ}}{2} \right)^2 \right)^2}{D_{УСТ,ШТ} \left( L_0 + \frac{L_X}{n_{\PhiАЗ} - 1} \cdot (i - 1) + \delta_i \right)}}, \quad (17)$$

где  $D_{УСТ,ШТ}$  – диаметр окружности вращения цапфы (установки цапфы) штока на головной секции, м;  $D_{УСТ,ГЦ}$  – диаметр окружности установки цапф корпусов гидроцилиндров на обечайке хвостовой секции, м (фиксированное значение, определяемое конструктивно);  $D_{П}$  – диаметр поршня гидроцилиндра, м;  $L_0$  – расстояние между цапфами корпуса и штока гидроцилиндра в сложенном состоянии (при минимальной раздвижности), м;  $L_X$  – длина хода штока гидроцилиндра, м;  $n_{ГР}$  – количество групп гидроцилиндров, находящихся в разных фазах выдвижения;  $n_{РАБ,ГР}$  – число гидроцилиндров в группе, совершающих рабочий ход;  $n_{\PhiАЗ}$  – количество промежуточных положений штоков (фаз);  $p_{ТР}$  – давление, подводимое в поршневую полость гидроцилиндра, Па;  $i = 1, 2, \dots$   $n_{ГЦ}$  – порядковый номер гидроцилиндра в группе;  $\delta_i$  – текущее положение штока  $i$ -го гидроцилиндра;  $\delta_i = 0 \dots \frac{L_X}{n_{\PhiАЗ} - 1}$ .

По мере выдвижения штока гидроцилиндра изменяется плечо силы, соответственно, будет изменяться и вращающий момент. Для оценки изменения развиваемого трансмиссией вращающего момента веден коэффициент неравномерности:

$$\Delta_M = 2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n_{PAB}} K_{\max i} - \sum_{i=1}^{n_{PAB}} K_{\min i}}{\sum_{i=1}^{n_{PAB}} K_{\max i} + \sum_{i=1}^{n_{PAB}} K_{\min i}}. \quad (18)$$

Полученные аналитические выражения позволили определить влияние конструктивных параметров (диаметра поршня  $D_{II}$ ) и количества гидроцилиндров ( $n_{ГЦ}$ ) на величину развиваемого трансмиссией вращающего момента  $M_{BP}$  (рис. 23) и построить зависимости для заданных размеров геохода ( $D_{ГC}$ ).

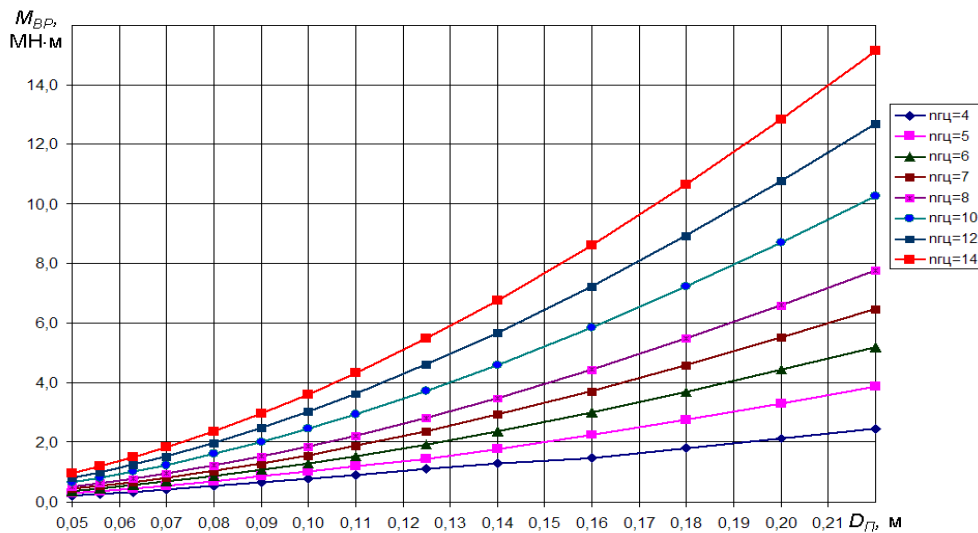


Рисунок 23 – Вращающий момент  $M_{BP}$  развиваемый трансмиссией геохода диаметром  $D_{ГC} = 3,2$  м от количества гидроцилиндров  $n_{ГЦ}$  и диаметра поршня  $D_{II}$

Были построены зависимости неравномерности момента  $\Delta_M$  (рис. 24) для синхронно выдвигающихся гидроцилиндров (кривая 1) и гидроцилиндров в разных фазах (кривая 2). Выявлено, что многофазные схемы работы гидроцилиндров трансмиссии обладают меньшей неравномерностью развиваемого вращающего момента, а увеличение их количества с 4 до 14 приводит к снижению коэффициента неравномерности с 8 до 0,1 %. В сравнении с синхронной работой гидроцилиндров многофазные схемы обеспечивают снижение коэффициента неравномерности от 2,5 до 13,4 раз при том же количестве гидроцилиндров.

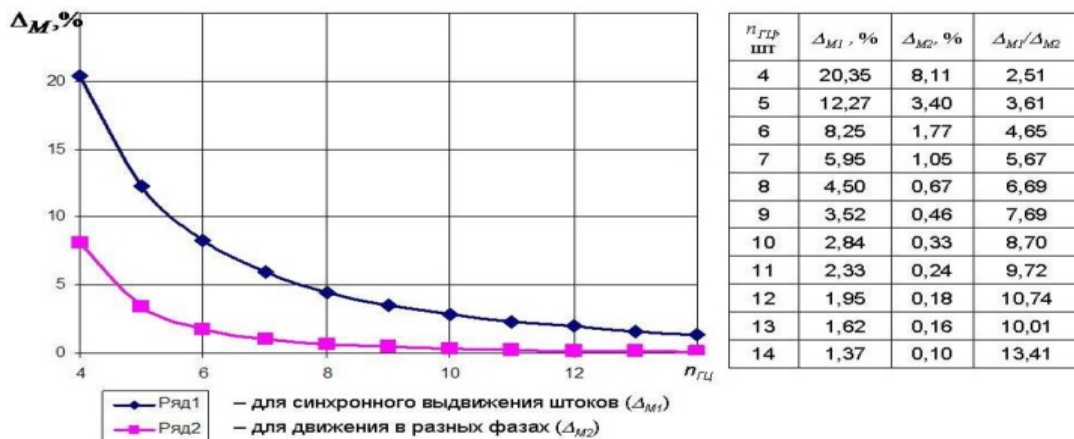


Рисунок 24 – График влияния количества гидроцилиндров  $n_{ГЦ}$  на величину неравномерности момента  $\Delta_M$

**Седьмая глава** посвящена разработке и созданию опытного образца геохода модели 401, диаметром 3,2 м. Разработка и изготовление опытного образца геохода выполнялась в рамках комплексного проекта «Создание и постановка на производство нового вида щитовых проходческих агрегатов многоцелевого назначения – геоходов» (договор № 02.G25.31.0076 от 23.05.2013 г.).

Исходными данными при создании опытного образца геохода послужили параметры и характеристики технического задания (ТЗ) на НИОКТР (таблица 1).

Таблица 1 – Основные заданные ТЗ параметры и характеристики

| №                                 | Наименование параметра                                                                 | Ед. изм.            | Значение             |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|
| <b>Горнотехнические условия</b>   |                                                                                        |                     |                      |
| 1                                 | Диаметр проводимой выработки в проходке                                                | м                   | 3,2                  |
| 2                                 | Площадь сечения в проходке                                                             | м <sup>2</sup>      | 8,0...8,08           |
| 3                                 | Угол наклона проводимой выработки                                                      | град                | ± 25                 |
| 4                                 | Крепость пород                                                                         | ед                  | 1...5                |
| <b>Технические характеристики</b> |                                                                                        |                     |                      |
| 1                                 | Производительность                                                                     | м <sup>3</sup> /мин | 0,6...0,8            |
| 2                                 | Скорость проходки                                                                      | м/час               | 4...6                |
| 3                                 | Тип привода                                                                            |                     | Гидравлич.           |
| 4                                 | Количество гидроцилиндров поворота, не менее                                           | шт                  | 8                    |
| 5                                 | Номинальное рабочее давление, не менее                                                 | МПа                 | 20                   |
| 6                                 | Крутящий момент на головной секции носителя геохода при номинальном давлении, не менее | кН·м                | 1,54·10 <sup>3</sup> |
| 7                                 | Суммарное осевое усилие подачи на забой, не менее                                      | кН                  | 850                  |
| 8                                 | Угол подъема винтовой лопасти внешнего движителя, в интервале                          | град                | 3...10               |
| 9                                 | Масса (без энергосиловой установки)                                                    | кг                  | 19000...22000        |
| 10                                | Установленная мощность, не менее                                                       | кВт                 | 410                  |
| 11                                | Диаметр геохода (по оболочке), не менее                                                | мм                  | 3200                 |
| 12                                | Длина геохода (по корпусу), не более                                                   | мм                  | 4500                 |

Основные конструктивные требования к опытному образцу геохода диаметром 3,2 метра:

1) корпус геохода должен иметь внешний движитель, элементы противовращения активно взаимодействующие с геосредой для создания требуемых тяговых и напорных усилий;

2) корпус геохода должен быть разборным и состоять из секций;

3) все функциональные исполнительные механизмы проходческой системы должны быть смонтированы на одной конструктивной базе;

4) металлоемкость конструкции при достаточной прочности должна быть снижена не менее чем на 60 % по сравнению с проходческими щитами традиционного исполнения;

5) величина передаваемых на исполнительный орган напорных усилий должна обеспечивать разрушение породы (геосреды) крепостью  $f = 1...5$  ед. по шкале М.М. Протодяконова;

6) для размещения оборудования корпус носителя должен обеспечивать габарит внутреннего свободного пространства не менее 75 % от диаметра геохода при выполнении условий прочности;

7) конструкция оболочки корпуса носителя геохода должна обеспечивать удельное сопротивление воздействию пород кровли не менее  $70 \text{ кН/м}^2$ ;

8) геоход должен разбираться на транспортабельные узлы для спуска в подземную монтажную камеру и доставки их к забою;

9) Конструктивное исполнение геохода должно обеспечивать безопасный доступ людей: в стабилизирующую секцию к элементам системы управления и регулирования во время работы геохода; в головную секцию и к исполнительным органам во время остановки всех исполнительных органов при работающей энергосиловой установке и трансмиссии в состоянии «реверс».

В состав разработанной продукции входит: опытный образец геохода; стартовый модуль.

На основании анализа и выбора приемлемых вариантов компоновки геохода в целом и его основных систем, описанных в главе 2 и заданных исходных данных ставилась задача создания основных систем и узлов опытного образца геохода.

Расчетная схема конструкции корпуса представляет собой цилиндрическую оболочку-обечайку, подкрепленную системой шпангоутов и стрингеров. С внутренней стороны шпангоуты и стрингеры усиливаются кольцевыми поясами или рамочными панелями, которые можно рассматривать как пояса усиления. В этом случае корпус секции геохода можно рассматривать как кольцевой брус с поперечным сечением в форме эквивалентного неравнополочного двутавра. Основные расчетные и заданные нагрузки на корпус геохода приведены в таблице 2

Таблица 2 – Нагрузки на корпус геохода

| № п/п                 | Наименование системы                           | Принятое техническое решение                  |
|-----------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Головной модуль       |                                                |                                               |
| 1                     | головная секция                                | двойная оболочка со шпангоутами и стрингерами |
| 2                     | исполнительный орган разрушения забоя          | двухбарабанный                                |
| 3                     | внешний движитель                              | двухзаходный лопастной винт                   |
| 4                     | исполнительный орган внешнего движителя        | бермовая фреза                                |
| 5                     | погрузочная система                            | роторного типа                                |
| Модуль сопряжения     |                                                |                                               |
| 6                     | корпус внешний (ротор)                         | двойная оболочка со шпангоутами и стрингерами |
| 7                     | корпус внутренний (статор)                     | двойная оболочка со шпангоутами и стрингерами |
| 8                     | трансмиссия                                    | гидравлическая (гидроцилиндры)                |
| 9                     | привод погрузочного ротора                     | цевочное колесо                               |
| Хвостовой модуль      |                                                |                                               |
| 10                    | стабилизирующая секция                         | двойная оболочка со шпангоутами и стрингерами |
| 11                    | элементы противовращения                       | плоская лопасть                               |
| 12                    | исполнительный орган элементов противовращения | бермовая фреза                                |
| 13                    | площадки обслуживания                          | съёмного типа                                 |
| Транспортный модуль   |                                                |                                               |
| 14                    | транспортная система                           | ленточный перегружатель                       |
| Энергосиловая система |                                                |                                               |
| 15                    | энергосиловая установка                        | выносная шестиконтурная                       |



Используя исходные данные был произведен расчет усилий и напряжений на корпусе геохода. Расчет проводился при следующих условиях: значение давления сверху 100 кПа, с боков 30 кПа, осевое усилие подачи 85 т. Полученные при этих условиях значения напряжений показаны на рисунке 25.

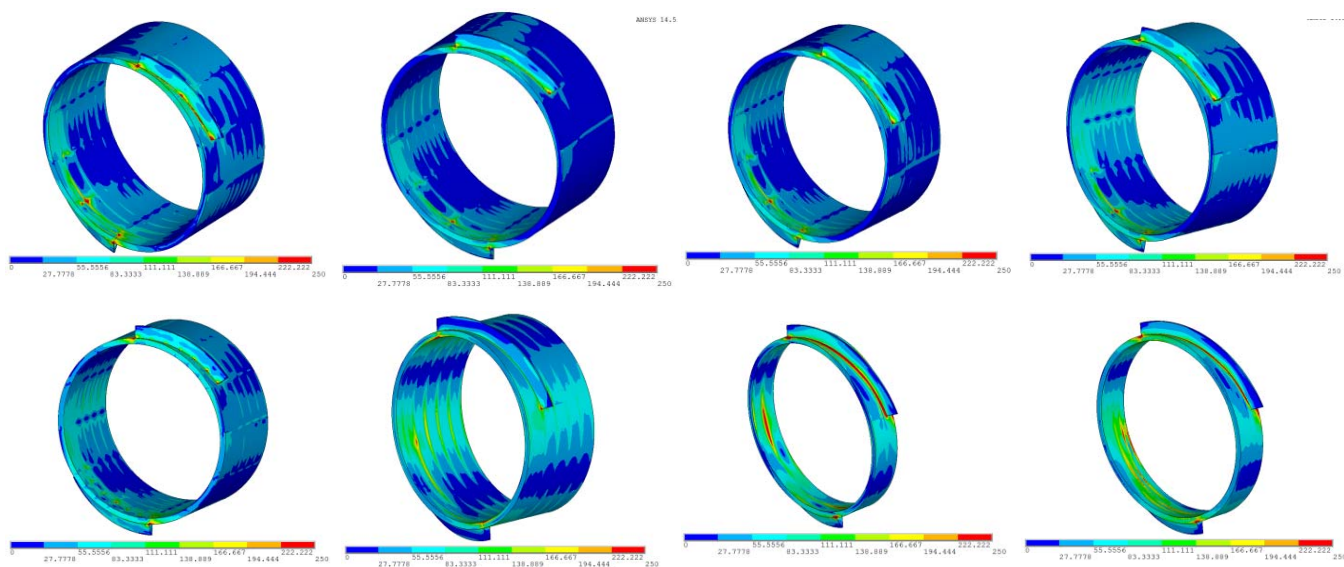


Рисунок 25 – Эпюры напряжений рассматриваемых моделей

Наиболее предпочтительным вариантом является следующее сочетание (модель № 6): наружная обечайка 16 мм, внутренняя обечайка 8 мм, кольца 8 мм. Шаг колец – 275 мм, шаг колец под лопастями – 125 мм, сектор лопасти не менее 90°, материал – сталь 09Г2С.

На основе разработанной методики, описанной в главе 6 для принятого схемного решения трансмиссии были определены параметры гидроцилиндров трансмиссии при заданном вращающем моменте на головной секции геохода  $M_{ВР.ТР} = 1,76 \cdot 10^6$  Нм. Расчеты показали, что наиболее рациональным диаметром поршня гидроцилиндров трансмиссии является  $D_{П} = 0,11$  м, а диаметр штока  $d_{ШТ} = 0,056$  м. Количество гидроцилиндров 16, из них одновременно работающих 8.

На основании результатов проведенных в диссертационной работе исследований в рамках выполнения комплексного проекта «Создание и постановка на производство нового вида щитовых проходческих агрегатов многоцелевого назначения – геоходов» были разработаны эскизный, технический проект, конструкторская и технологическая документация на изготовление опытного образца. Суммарный объем проведенных НИОКР при выражении его в количестве разработанных документов в пересчете на формат А4 составил более 14 тысяч листов.

В дальнейшем были изготовлены (рисунок 26): головной модуль, в т. ч.: головная секция; исполнительный орган разрушения забоя; внешний движитель; исполнительный орган внешнего движителя; погрузочный ротор; модуль сопряжения; гидроцилиндры трансмиссии; привод погрузочного ротора; хвостовой модуль, в т. ч.: стабилизирующая секция; элементы противовращения; исполнительный орган элементов противовращения; площадки обслуживания; транспортный модуль, в т. ч.: ленточный перегружатель; энергосиловая установка; гидрооборудование; система управления геохода.





Рисунок 26 – Сборка опытного образца геохода



Сборка опытного образца геохода осуществлялась на ОАО «КОРМЗ». В настоящее время опытный образец прошёл стендовые испытания и ведется подготовка к проведению приемочных испытаний (рисунок 27).



Рисунок 27 – Опытный образец геохода. Общий вид

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решается научная проблема разработки научных основ создания систем геохода, имеющая важное, на современном этапе развития экономики, хозяйственное значение для горного машиностроения и отраслей, связанных со строительством подземных сооружений различного назначения. Основные выводы, конкретные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Существующие проходческие системы развиваются по экстенсивному пути, который исчерпал свои возможности. Новый подход к созданию проходческой техники, вовлекающий геосреду в процесс движения машины, требует формирования нового научно-методического обеспечения – геодинамики подземных аппаратов – науки, изучающей силы, возникающие на поверхности твердого тела движущегося в твердой среде. Принцип взаимодействия с геосредой и особенности работы геохода обуславливают предъявление специфических требований к геоходу и его основным системам.

Перебор комбинаций значений вариативных признаков позволяет синтезировать компоновочные решения геохода и проводить их сравнительный анализ применимости для разных условий. На данном этапе предпочтительным является компоновочное решение геохода с расположением внешнего движителя на головной секции и энергосиловой установкой, вынесенной за пределы геохода.

Математическая модель взаимодействия геохода с геосредой, учитывающая особенности его функционально-компоновочной схемы, параметры геосреды и горнотехнические условия проведения выработки, позволяет определять основные силовые параметры трансмиссии геохода.

2. По нормированной интегральной функции определена вероятность того, что величина зазора принимает «отрицательное» значение, или того, что агрегат заклинит в выработке – при номинальном размере вероятность опасности не превышает 3 %, а в деформированной выработке уменьшается до 2 %.

Разработана математическая модель отражающая малую вероятность существования радиусов, значительно отклоняющихся от среднего размера (наличия выбросов

вследствие нарушения «цилиндричности» агрегата). Такое ограничение отражает влияние технических регламентов на эксплуатацию горных машин. В итоговом распределении с вероятностью 65 % представлены выработки с номинальными размерами, а примерно в 35 % совокупности возможны выработки, деформированные в ходе проведения работ.

3. Разработана модель взаимодействия ножевых исполнительных органов с геосредой, которая позволила:

- выявить связь между геометрическими параметрами винтовой линии внешнего движителя ( $h_g$  – шагом и  $\beta$  – углом наклона винтовой линии) и геометрическими параметрами ножевого исполнительного органа ( $l$  – длина радиального ножа,  $\beta_i$  – угол под которым расположена каждая  $i$ -тая точка ножа);
- выявить связь между радиальными размерами геохода и геометрическими параметрами ножевого исполнительного органа;
- определить зависимости силовых параметров от различных типоразмеров и конструктивных исполнений ножевого исполнительного органа геохода.

Геометрические параметры ножевого исполнительного органа геохода определяются геликоидной формой поверхности забоя, параметры которого зависят от параметров внешнего движителя и диаметра геохода, и являются различными для каждого размера геохода.

4. В качестве критерия оценки компоновочных и конструктивных решений исполнительных органов должны использоваться полученные в результате математического моделирования значения фоновых напряжений создаваемых суммарным воздействием ИО на породу забоя:

- смещение фоновых напряжений в сторону растяжения создает предпосылки к снижению удельной энергоёмкости процесса разрушения породы и снижению требований к мощности привода ИО;
- при моделировании процесса взаимодействия ИО с породой применение распределенных нагрузок, эквивалентных суммарному действию от отдельных резцов, обеспечивает достоверность определения значений фоновых напряжений.

5. Наличие уступа в забое геохода приводит к смещению главных напряжений в породе в сторону растяжения  $\sigma_3$  на 1,5...5,2 МПа,  $\sigma_1$  на 0,5...0,7 МПа. Это создает предпосылки к снижению удельной энергоёмкости процесса разрушения породы. Поэтому формирование забоя с уступом является предпочтительным по сравнению с плоским забоем.

Влияние уступа на напряжения в породе определяется формой уступа и его расположением относительно других уступов и элементов выработки.

В число основных параметров, определяющих форму забоя, входят: угол ( $\gamma$ ) наклона ПВ к фронтальной плоскости забоя; отношение высоты уступа к размеру цилиндрического инструмента ( $h/D$ ). В число основных параметров, определяющих расположение уступов, входят: отношение расстояния между уступами к высоте уступа ( $l/h$ ); угол ( $\alpha$ ) наклона внутренней кромки к оси выработки.

При  $\gamma < 70^\circ$  главные напряжения  $\sigma_3$  на большей части поверхности взаимодействия имеют положительные значения, что говорит о преобладании трехосного сжатия. С увеличением  $\gamma$  напряжения смещаются в сторону растяжения. При углах  $\gamma \geq 80^\circ$  напряжения  $\sigma_3$  принимают отрицательные значения на всей ПВ, что полностью исключает возможность появления областей трехосного сжатия. Увеличение угла  $\gamma$  от  $10^\circ$  до  $120^\circ$  приводит к смещению  $\sigma_3$  на 4...6 МПа в сторону растяжения, что создает предпосылки к снижению удельной энергоёмкости процесса разрушения породы.

При отношении  $h/D < 0.25$  на большей части ПВ  $\sigma_3$  положительные, что говорит о преобладании трехосного сжатия. При  $h/D > 0.5$  с ПВ полностью исчезают области трехосного сжатия. С ростом отношения  $h/D$  от 0,125 до 0,6 значения главных напряжений  $\sigma_3$  смещаются на 2...5 МПа в сторону растяжения, при  $h > 0.6D$  возможен неконтролируемый скол в области наружной кромки уступа из-за превышения фоновыми напряжениями предел прочности породы на одноосное растяжение.

В диапазоне  $0 < l/h < 1,25$  увеличение отношения  $l/h$  приводит к смещению главных напряжений в сторону растяжения, при  $l/h > 1,25$  расстояние между уступами не оказывает явного влияния на главные напряжения.

6. При формировании и разрушении уступа с радиально направленной внутренней кромкой на поверхности забоя имеют место характерные концентрические зоны, радиус которых  $r$  пропорционален шагу движителя  $h_b$ :

- $0 < r < 0.016h_b$  – вся ПВ в области трехосного сжатия, преимущества забоя с уступом полностью утрачиваются, необходимо применять приемы разрушения, отличные от приемов, применяемых в периферийной области;
- $0.016h_b < r < 0.032h_b$  – на ПВ преобладают области трехосного сжатия, преимущества забоя с уступом проявляются слабо;
- $0.032h_b < r < 0.064h_b$  – трехосное сжатие на меньшей части ПВ;
- $0 < r < 0.2h_b$  – с увеличением радиальной координаты значения главных напряжений в породе смещаются в сторону растяжения;
- $r < 0.2h_b$  – влияние радиальной координаты на значения главных напряжений в породе носит неявный характер.

Изменение угла наклона образующей забоя позволяет управлять отношением  $l/h$ . Применение рациональной формы образующей обеспечивает управляемое смещение главных напряжений в центральной области забоя.

Формирование забоя, выступающего внутрь выработки, является предпочтительным.

7. Предложена систематизация схем трансмиссии геохода для передачи вращения головной секции и проанализированы возможные направления их развития. Разрабатываемые схемы трансмиссий, для непрерывного вращения головной секции и одновременного поступательного перемещения стабилизирующей секции перемещения секций должны иметь специальный узел сопряжения.

Разработаны схемные решения трансмиссии геохода с гидроцилиндрами, при этом наиболее эффективная работа гидроцилиндров по вкладу в развиваемый вращающий момент достигается в многофазных схемах, т. е. при наибольшем количестве гидроцилиндров совершающих рабочий ход.

Установлено, что в схемах трансмиссии с гидроприводом непрерывность вращения головной секции обеспечивается работой гидроцилиндров в многофазных схемах при количестве гидроцилиндров, совершающих рабочий ход равном или большем количества гидроцилиндров, совершающих обратный ход. При этом число групп гидроцилиндров в многофазных схемах должно быть кратно общему числу всех гидроцилиндров в трансмиссии.

8. Разработана математическая модель описывающая взаимосвязь основных параметров трансмиссии, позволяющая определять развиваемый трансмиссией вращающий момент, угловую скорость вращения головной секции, коэффициенты неравномерности вращающего момента и угловой скорости, конструктивные параметры размещения гидроцилиндров и других элементов трансмиссии, габаритный размер свободного пространства внутри геохода, величину потребного расхода рабочей жидкости,

в зависимости от принятых размеров геохода (диаметра головной секции), количества гидроцилиндров, приемлемого значения неравномерности момента, требуемого габарита внутреннего пространства.

Выявлено, что многофазные схемы работы гидроцилиндров трансмиссии обладают меньшей неравномерностью развиваемого вращающего момента, а увеличение их количества с 4 до 14 приводит к снижению коэффициента неравномерности с 8 до 0,1%. В сравнении с синхронной работой гидроцилиндров многофазные схемы обеспечивают снижение коэффициента неравномерности от 2,5 до 13,4 раз при том же количестве гидроцилиндров.

Установлено, что изменение количества гидроцилиндров трансмиссии, размещенных в одной плоскости с 4 до 14 способствуют увеличению диаметра окружности, вписанной в габарит свободного пространства внутри геохода с 66 до 90 процентов от диаметра геохода по наружной поверхности оболочек секций.

9. Создан опытный образец геохода модели 401 диаметром 3,2 м в рамках договора 02.G25.31.0076 от 23.05.2013 г. и технического задания к нему на условиях открытого конкурса Министерства образования и науки РФ по реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 218 от 09.04.2010 г.

В ходе реализации проекта были получены и применены новые технические решения всех систем опытного образца геохода в соответствии с современным состоянием развития техники и технологий, которые составляют новую оригинальную компоновочную схему геохода.

Получены технические параметры энергосиловой установки, системы внешнего движителя, трансмиссии и исполнительных органов опытного образца геохода в соответствии с заданными горнотехническими условиями и техническими характеристиками.

Направления дальнейших исследований:

1. Разработка основы создания геодинамики подземных аппаратов.
2. Разработка элементов теории создания геоходов и его систем.
3. Разработка основ создания законтурных крепей и объедок подземных сооружений.
4. Создание геоходных технологий строительства подземных выработок.
5. Разработка основы создания подземных роботов.
6. Разработка системы управления подземными роботами.
7. Разработка методологии проведения испытаний геоходов.
8. Разработка и создание стенда для проведения исследований по направлениям геоходоостроения.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах**

#### **Статьи в изданиях рекомендованных ВАК:**

1. Аксенов В.В. Требования к внешнему движителю геохода [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, А.Ю. Дугина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2008. – № 5. – С. 3–7.
2. Аксенов В.В. Геовинчестерная технология и геоходы – инновационный подход к освоению подземного пространства [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков // Известия вузов. Горный журнал. – Екатеринбург, 2008. – № 4. – С. 19–27.
3. Компоновочные решения машин проведения горных выработок на основе геовинчестерной технологии [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Бегляков,

П.В. Бурков, М.Ю. Блащук, А.В. Сапожкова // Горный информационный аналитический бюллетень. – Москва, МГГУ, 2009. – № 1. – С. 251–259.

4. Аксенов В.В. Геовинчестерная технология и геоходы – наукоемкий и инновационный подход к освоению недр и формированию подземного пространства [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков // Уголь. – Москва, 2009. – № 2. – С. 26–29.

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

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

7. Обоснование необходимости разработки трансмиссии геоходов [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев // Вестник КузГТУ. – Кемерово, 2009. – № 3. – С. 24–27.

8. Формирование требований к основным системам геохода [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Садовец, М.Ю. Блащук, В.Ю. Бегляков // Перспективы развития горно-транспортных машин и оборудования: Сборник статей. Отдельный выпуск Горного информационного аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). – 2009. – 10. – 432. – М.: Издательство «Горная книга» (Горный инженер). – С. 107–118.

9. Аксенов В.В. Устройство противовращения геохода [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, Е.В. Рязанова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – Т. 10. – № 12. – С. 119–130.

10. Аксенов В.В. Формирование структурного портрета геохода [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Садовец, Е.В. Резанова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 01. – С. 35–41.

11. Аксенов В.В. Создание инновационного инструментария для формирования подземного пространства [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Садовец, Е.В. Резанова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 1. – С. 42–47.

12. Аксенов В.В. Обзор существующих систем органов перемещения горных машин [Текст] / В.В. Аксенов, А.В. Сапожкова, А.Б. Ефременков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2010. – № 2. – С. 25–29.

13. Ефременков А.Б. Распределения случайного зазора между корпусом геохода и забоем при проведении горных выработок [Текст] / А.Б. Ефременков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – Т. 3. – № 12. – С. 9–15.

14. Моделирование взаимодействия корпуса носителя геохода с геосредой [Текст] / 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.

15. Обзор трансмиссий горной техники [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Тимофеев, М.Ю. Блащук. // Горный информационный аналитический бюллетень. Горное машиностроение. – Москва, МГГУ, 2010. – ОВ №3. – С. 55–66.

16. Аксенов В.В. Проблемы создания нового инструментария для формирования подземного пространства [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – Т. 3. – № 12. – С. 101–118.

17. Аксенов В.В. Обоснование необходимости разработки внешнего движителя геохода [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, А.В. Сапожкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – Т. 3. – № 12. – С. 131–136.

18. Аксенов В.В. Обзор волновых передач возможных к применению в трансмиссии геохода [Текст] / В.В. Аксенов, В.Ю. Тимофеев, М.Ю. Блашук, А.Б. Ефременков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – Т. 3. – № 12. – С. 137–148.

19. Анализ возможных вариантов электропривода и механических передач в трансмиссии геохода [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Тимофеев, М.Ю. Блашук // Горный информационный аналитический бюллетень. Горное машиностроение. – Москва, МГГУ, 2010. – ОВ № 3. – С. 154–163.

20. Аксенов В.В. Влияние динамических процессов, формирующихся в рабочих режимах, на силовые параметры ножевого исполнительного органа геохода [Текст] / В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, А.Б. Ефременков, В.Ю. Бегляков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – Т. 3. – № 12. – С. 164–178.

21. Аксенов В.В. Пути развития технических решений устройств противовращения геоходов [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Садовец, Е.В. Резанова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – Т. 3. – № 12. – С. 179–183.

22. Разработка и анализ возможных вариантов гидропривода в трансмиссии геохода [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Тимофеев, М.Ю. Блашук // Горный информационный аналитический бюллетень. Горное машиностроение. – Москва, МГГУ, 2010. – ОВ № 3. – С. 184–193.

23. Аксенов В.В. Формирование нового подхода к синтезу технических и конструктивных решений геоходов [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Садовец, Е.В. Резанова // Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal). Горное машиностроение. – М.: издательство «Горная книга». – 2010. – ОВ № 3. – С. 194–210.

24. Аксенов В.В. Разработка и анализ возможных вариантов гидро- и электропривода в трансмиссии геохода [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Тимофеев, М.Ю. Блашук // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 3. – С. 7–14.

25. Аксенов В.В. Обоснование требований к устройствам противовращения геоходов [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Садовец, Е.В. Резанова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2010. – № 2 (42). – С. 109–114.

26. Forming the subterranean space by means of a new tool (geohod) [Tekst] / A.V. Efremenkov // в сборнике: Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2011. – 2011. – С. 348–350.

27. Аксенов В.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния породы, создаваемого воздействием на нее исполнительного органа горной машины [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Бегляков // Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal). Перспективы развития горнотранспортного оборудования. – М.: издательство «Горная книга». – 2011. – ОВ № 5. – С. 9–15.



28. Влияние суммарного воздействия исполнительных органов горных машин на напряжения в зоне действия отдельно взятого резца [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Бегляков // Горный информационный аналитический бюллетень. Перспективы развития горно-транспортных машин и оборудования. – Москва, МГГУ, 2011. – ОВ № 5. – С. 15–21.

29. Аксенов В.В. Биротативный проходческий щитовой агрегат (бпща) [Текст] / В.В. Аксёнов, А.Б. Ефременков, Б.Ф. Лелюх // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S2. – С. 9–15.

30. Аксенов В.В. Анализ технических решений устройств противовращения горнопроходческих агрегатов [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, Е.В. Резанова // Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal). Горное машиностроение. – М.: издательство «Горная книга». – 2011. – ОВ № 2. С. 43–54.

31. Аксенов В.В. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород, вмещающих выработку с системой законтурных винтовых и продольных каналов [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, Е.В. Резанова // Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal). Горное машиностроение. – М.: издательство «Горная книга». – 2011. – ОВ № 2. – С. 24–42.

32. Аксенов В.В. Разработка математической модели взаимодействия геохода с геосредой [Текст] / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, А.Б. Ефременков, В.Ю. Тимофеев // Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal). Горное машиностроение. – М.: издательство «Горная книга». – 2011. – ОВ № 2. – С. 79–91.

33. Аксенов В.В. Определение габарита свободного внутреннего пространства геохода с гидроприводом [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук // Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal). Перспективы развития горнотранспортного оборудования. – М.: издательство «Горная книга». – 2012. – ОВ № 2. – С. 50–55.

34. Определение неравномерности развиваемого трансмиссией вращающего момента [Текст] / Аксенов В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук // Горный информационный аналитический бюллетень. Горное машиностроение. – Москва, МГГУ, 2011. – ОВ № 5. – С. 154–164.

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

36. Обоснование нагрузки на поверхности взаимодействия крыла устройства противовращения геохода с геосредой [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, Е.В. Резанова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 2 (90). – С. 24–27.

37. Опыт применения устройств противовращения в геоходах [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, Е.В. Резанова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 2 (90). – С. 19–24.

38. Влияние суммарного воздействия исполнительных органов горных машин на напряжения в зоне действия отдельно взятого резца [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Бегляков // Горный информационный аналитический бюллетень.

Перспективы развития горно-транспортных машин и оборудования. – Москва, МГГУ, 2011. – ОВ № 5. – С. 15–21.

39. Determination of necessary forces for geohod movement [Tekst] / A.B. Efremenkova, V.Y. Timofeev // в сборнике: Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012. – 2012. – С. 211–214.

40. Опыт применения устройств противовращения в геоходах [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, Е.В. Резанова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 2 (90). – С. 19–24.

41. The influence of relative distance between ledges on the stress-strain state of the rock at a face [Tekst] / V.V. Aksenov, A.B. Efremenkova, V.Y. Beglyakov // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Т. 379. – С. 16–19.

42. Sadovets, V.Y. Simulation of geokhod movement with blade actuator [Tekst] / V.Y. Sadovets, V.Y. Beglyakov, A.B. Efremenkova // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 384–390.

#### **Патенты и авторские свидетельства РФ:**

43. Биротативный проходческий щитовой агрегат [Текст]: пат. RUS 2412354; Б.Ф. Лелюх, В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков. – 31.07.2009.

44. Проходческий щитовой агрегат (геоход) [Текст]: пат. RUS 2418950; В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Тимофеев, В.Ю. Бегляков, М.Ю. Блащук. – 05.10.2009.

45. Проходческий щитовой агрегат [Текст]: пат. RUS 112269; В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук, Б.Ф. Лелюх, В.Ю. Бегляков. – 13.12.2010.

46. Геоход (проходческий щитовой агрегат) [Текст]: пат. RUS 2552539; В.В. Аксенов, А.В. Сляднев, А.Б. Ефременков, А.А. Хорешок, Б.Г. Масалитин, В.Ю. Бегляков, В.Ю. Тимофеев. – 04.12.2013.

47. Дуплексный геоход [Текст]: пат. RUS 2469192; В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, Б.Ф. Лелюх, В.Ю. Садовец. – 24.05.2011.

#### **Прочие публикации:**

48. Тимофеев В.Ю. Разработка трансмиссии геохода с волновой передачей [Текст]: монография / В.Ю. Тимофеев, В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков. – Германия: Издательский дом: Lap Lambert Academic Publishing, – 2012. – 216 с.

49. Блащук М.Ю. Гидравлические трансмиссии геоходов [Текст]: монография / М.Ю. Блащук, В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков. – Томск, 2014. – 123 с.

50. Mining engineering [Текст]: монография / А.Г. Широколобова, А.А. Хорешок, А.Б. Ефременков; Кузбасский государственный технический университет; Юргинский технологический институт. – Юрга: Типография ООО «МедиаСфера», 2015. – 129 с.

51. Ефременков А.Б. Автоматическое устройство динамической неуравновешенности ротора [Текст]: автореф. дис... канд. техн. наук / А.Б. Ефременков. – Томск, 2000. – 16 с.

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

53. Обоснование необходимости разработки трансмиссии геоходов [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев // Труды VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии и экономика в машиностроении». – Юрга, 15–16 мая, 2008 г. – С. 409–413.

54. Разработка требований к трансмиссии геоходов [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев // в сборнике: Инновационные

технологии и экономика в машиностроении // Труды VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2008. – С. 414–417.

55. Устройство противовращения геоходов [Текст] / В.В. Аксёнов, А.Б. Ефременков, Е.В. Резанова // в сборнике: Инновационные технологии и экономика в машиностроении // Труды VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2008. – С. 417–423.

56. Аксенов В.В. Геовинчестерная технология и геоходы – новый подход к освоению недр и формированию подземного пространства [Текст]: Тр. VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков. – Юрга, 15–16 мая, 2008 г. – С. 423–429.

57. Освоение недр и формирование подземного пространства требует создания нового инструментария [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков // в сборнике: Нетрадиционные и интенсивные технологии разработки месторождений полезных ископаемых // под общей ред. В.Н. Фрянова. – 2008. – С. 35–47.

58. Разработка требований к основным системам геохода [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев, А.В. Сапожкова // Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров: III Международный научно-методический семинар – Суус (Тунис), Донецк, Дон ПТУ, 22 окт. – 1 нояб. 2009. – Донецк: [s.n.], 2009. – С. 123–129.

59. Моделирование взаимодействия корпуса носителя с геосредой [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Тимофеев, М.Ю. Блащук // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – ЮТИ ТПУ, Юрга: Изд. ТПУ, 2009. – С. 585–589.

60. Обзор волновых передач возможных к применению в трансмиссии геохода [Текст] / В.В. Аксёнов, В.Ю. Тимофеев, М.Ю. Блащук, А.Б. Ефременков // в сборнике: Инновационные технологии и экономика в машиностроении: труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2009. – С. 607–613.

61. Проблемы создания нового инструментария для формирования подземного пространства [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков // в сборнике: Инновационные технологии и экономика в машиностроении: труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2009. – С. 613–623.

62. Обзор трансмиссий горной техники [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук, В.Ю. Тимофеев // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – ЮТИ ТПУ, Юрга: Изд. ТПУ, 2009. – С. 640–646.

63. Обоснование необходимости разработки внешнего движителя [Текст] / В.В. Аксёнов, А.Б. Ефременков, А.В. Сапожкова // в сборнике: Инновационные технологии и экономика в машиностроении: труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2009. – С. 646–649.

64. К вопросу о разработке математической модели взаимодействия геохода с геосредой [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Тимофеев // в сборнике: Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: труды международной научно-практической конференции. Министерство энергетики Российской Федерации; Администрация Кемеровской области; Администрация г. Кемерово; Сибирское отделение Российской академии наук; Кемеровский

научный центр СО РАН; Институт угля СО РАН; Кузбасский государственный технический университет; ООО КВК «Экспо-Сибирь». – 2010. – С. 224–228.

65. Обсуждение подходов к определению сил сопротивления движению геохода. сухое трение [Текст] / В.В. Аксёнов, А.Б. Ефременков, Е.В. Резанова // в сборнике: Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых. – 2010. – С. 466–473.

66. Разработка вариантов компоновочных решений гидравлической трансмиссии геохода [Текст] / 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». 20–21 мая, 2010 г. – ЮТИ. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – С. 461–466.

67. Определение силовых параметров трансмиссии геоходов с гидроцилиндрами [Текст] // Тр. XII межд. научно-практ. конф. «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук. – Кемерово: ИУУ СО РАН, КузГТУ, ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, ЗАО КВК «Экспо-Сибирь», 2010. – С. 202–205.

68. Аксенов В.В. Влияние уступа на НДС призабойной части горной выработки, при проходке геоходом [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Садовец, В.Ю. Бегляков // Тр. XII межд. научно-практ. конф. «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». – Кемерово: ИУУ СО РАН, КузГТУ, ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, ЗАО КВК «Экспо-Сибирь», 2010. – С. 216–224.

69. Force parameters of geohod transmission with hydraulic drive in various movement phases [Tekst] / A.B. Efremenkov, V.V. Aksenov, M.Yu. Blashchuk // в сборнике: Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012. – 2012. – С. 159–163.

70. Определение силовых параметров трансмиссии геохода с гидроприводом [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук, Я.Г. Рыльцева // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 1 (2). – С. 365–371.

71. Анализ возможности применения редукторного привода в трансмиссии геохода [Текст] / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, М.Ю. Блащук, Я.Г. Рыльцева // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 1 (2). – С. 372–378.

72. Садовец В.Ю. Разработка модели кинематических особенностей геохода. Инновационные технологии экономика в машиностроении [Текст] / В.Ю. Садовец, В.Ю. Бегляков, А.Б. Ефременков. // Сборник трудов V Международная научно-практическая конференция: в 2-х т. – Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – Т.2. – С. 292–298.

73. Создание нового инструментария для формирования подземного пространства [Текст] / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, А.Б. Ефременков, А.А. Казанцев, В.Ю. Бегляков, А.В. Вальтер // Горная Техника. – 2015. – № 1 (15). – С. 24–26.

74. Моделирование особенностей движения геохода с ножевым исполнительным органом [Текст] / В.Ю. Садовец, В.Ю. Бегляков, А.Б. Ефременков // в сборнике: Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Юргинский технологический институт. – 2014. – С. 86–89.

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

[2], [4], [12], [15], [22], [24], [30], [31], [41], [42], [46], [47], [55], [56], [67], [68] – постановка задачи, проведение аналитического обзора, формулировка выводов;

[9], [10], [11], [14], [20], [25], [26], [27], [32], [33], [36], [37], [44], [45], [53], [54], [65], [66] – выполнение основного объема исследований, обработка полученных результатов, формулировка выводов;

[1], [3], [16], [19], [23], [38], [39], [40], [48], [50], [71], [72] – постановка задачи, верификация модели;

[7], [18], [28], [34], [35], [57], [58], [59], [60], [63], [64] – обработка информации, формулировка выводов;

[4], [8], [21], [29], [6], [13], [43], [49], [51], [52], [61], [62], [69], [70], [73], [74] – проведение аналитического обзора, формулировка выводов.

Подписано к печати 23.06.2016 г. Формат 60x84/16

Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 120 экз. Заказ \_\_\_\_

Отпечатано в типографии ООО «Медиасфера».

652050, Юрга, ул. Ленинградская, 4.