На правах рукописи

Equalop

Ермаков Александр Николаевич

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНТУРНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ГЕОХОДОВ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД СРЕДНЕЙ КРЕПОСТИ

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Кемерово – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева».

Научный руководитель: Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Хорешок Алексей Алексеевич
Габов Виктор Васильевич	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (г. Санкт-Петербург), кафедра машиностроения, профессор
Антонов Юрий Анатольевич	кандидат технических наук, доцент, в настоящее время не работает
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего об- разования «Тульский государственный университет» (г. Тула)

Защита состоится «09» февраля 2017 г. в 13:00 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, е-mail: <u>siyu.eav@kuzstu.ru</u>

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/erm/Dissertation.pdf

Автореферат разослан «____» декабря 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Семыкина Ирина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Необходимость развития технологий и техники для освоения подземного пространства определяется в Российской Федерации на законодательном уровне и отмечается во многих научных работах. В программах развития и импортозамещения тяжелого машиностроения также отмечается необходимость разработки техники для ведения проходческих работ, что свидетельствует о недостаточной развитости данного направления.

В результате ряда исследований, направленных на увеличение производительности и повышение уровня безопасности ведения проходческих работ, сформирован новый подход к проведению горных выработок – геовинчестерная технология (ГВТ), базовым элементом которой является геоход. Принципиальной особенностью геоходов является наличие винтовых и продольных законтурных каналов, участвующих в создании напорного усилия и стабилизации геохода. За разрушение породы в законтурном массиве для формирования каналов с заданными профилем и размерами, а также удаление разрушенной породы из канала отвечает система формирования законтурных каналов.

Система формирования законтурных каналов является ключевой и неотъемлемой для ГВТ, а отсутствие обоснованных параметров законтурных исполнительных органов (ЗИО) геохода для пород средней крепости, непосредственно отвечающих за разрушение породы в законтурном массиве, и методик их определения сдерживает создание геоходов. Вышесказанное позволяет заключить, что тема исследования, направленная на обоснование параметров ЗИО геоходов для разрушения пород средней крепости, является актуальной.

Работа выполнена 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.) и базовой части государственного задания Минобрнауки России по проекту №632 «Исследование параметров технологии и техники для выбора и разработки инновационных технических решений по повышению эффективности эксплуатации выемочно-проходческих горных машин в Кузбассе».

Диссертационные исследования были поддержаны именной стипендией Губернатора Кемеровской области А.Г. Тулеева, а также грантами АО «СУЭК-Кузбасс» на проведение научных исследований по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологии в области рационального природопользования в 2015 и 2016 годах.

Степень разработанности.

Исследованию законтурных элементов геоходов и ЗИО посвящены работы А.Ф. Эллера, В.В. Аксенова, В.Ф. Горбунова, В.Д. Нагорного, В.Ю. Садовца, А.Б. Ефременкова, В.Ю. Беглякова, в которых рассмотрены компоновочные схемы законтурных лопастей, определены геометрические, кинематические и силовые параметры пассивных (ножевых) ЗИО. При этом авторами в большей степени рассматривались системы формирования законтурных каналов для пород крепостью до 1 ед. по шкале М.М. Протодьяконова. Исследования в области ЗИО геохода для пород средней крепости не проводились.

Цель работы: обоснование рациональных параметров законтурных исполнительных органов геохода, обеспечивающих эффективную работу по разрушению пород средней крепости.

Идея работы заключается в оценке, анализе и сравнении параметров различных принципиальных решений законтурных исполнительных органов и схем набора инструмента, обеспечивающих требуемые скорости подачи геохода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать схемные решения ЗИО геохода для разрушения пород средней крепости.

2. Разработать математическую модель работы ЗИО геохода.

3. Оценить и сравнить эффективность схемных решений ЗИО геохода при работе в породах средней крепости по конструктивным, кинематическим и силовым параметрам.

4. Обосновать параметры ЗИО опытного образца геохода диаметром 3,2 м.

Научная новизна:

1. Разработаны новые схемные решения ЗИО геохода для разрушения пород средней крепости с различными схемами набора инструмента, отвечающие требованиям и обеспечивающие необходимую производительность геохода.

2. Разработана компьютерная модель, позволяющая производить комплексную оценку силовых и кинематических параметров работы исполнительных органов в породах средней крепости, отличающаяся от известных тем, что учитывает характер подачи ЗИО геохода.

3. Для ЗИО геохода, работающих в породах средней крепости, впервые установлены зависимости износа режущего инструмента, крутящего момента, удельной энергоемкости разрушения забоя, массы и выступа во внутреннее пространство геохода от параметров винтовых и продольных законтурных каналов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Предложенные в работе математические модели и подход к разработке схемных решений ЗИО геоходов для разрушения пород средней крепости могут быть использованы при создании новых образцов законтурных элементов геоходов в проектно-конструкторских и научно-технических организациях.

Методология и методы исследования.

В работе использован комплексный метод исследований, включающий научный анализ опыта проектирования и эксплуатации исполнительных органов проходческих и добычных машин, известные методики расчета усилий резания и подачи на резцах, синтез схемных решений законтурных исполнительных органов геохода, компьютерное математическое моделирование, а также методы математической статистики и аналитической геометрии.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. При разрушении пород средней крепости законтурными исполнительными органами, формирующими винтовые и продольные каналы для геоходов диаметром от 2,1 до 5,6 м, число резцов определяется требуемой скоростью подачи законтурных исполнительных органов и коэффициентом вариации крутящего момента заданного уровня.

2. Законтурный исполнительный орган корончатого типа в сравнении с дисковым обеспечивает более эффективную работу по формированию законтурных каналов для геоходов диаметром от 2,1 до 5,6 м в породах средней крепости по силовым, энергетическим, кинематическим, массовым и габаритным параметрам.

3. От работы корончатых законтурных исполнительных органов элементов противовращения момент на секции геохода по направлению определяется направлением вращения коронок и может быть полностью компенсирован при четном числе коронок, а осевое усилие на геоходе направлено против подачи геохода. От работы корончатых законтурных исполнительных органов внешнего движителя момент на секции геохода направлен против вращения геохода, а направление осевого усилия на геоходе определяется направлением вращения коронок и может быть только частично компенсировано при четном числе коронок.

Личный вклад автора заключается:

- в разработке схемных решений ЗИО геоходов для формирования каналов в породах средней крепости;

- в разработке компьютерной модели работы ЗИО геохода;

- в получении аналитических выражений для определения суммарного пути трения инструмента, крутящего момента на резание, удельной энергоемкости разрушения породы и результирующих усилий от работы ЗИО геохода.

Достоверность.

Научные положения, выводы и рекомендации обоснованы достаточным объемом аналитических исследований, базирующихся на применении современных научных методов, а также апробированных методик и положений теории резания горных пород. Относительная погрешность результатов моделирования в сравнении с результатами расчетов по аналитическим зависимостям не превышает 4 %, а результатов расчета по полученным упрощенным зависимостям в сравнении с результатами моделирования – не более 1 %.

Реализация выводов и рекомендаций работы.

Полученные результаты работы использованы при разработке и изготовлении законтурных исполнительных органов опытного образца геохода на базе предприятия ОАО «КОРМЗ» (г. Кемерово).

Апробация работы.

Основные результаты работы и ее отдельные положения докладывались на научно-практических конференциях: международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2015» (Москва, 2015 г.); «Инновации на транспорте и в машиностроении» (Санкт-Петербург, 2016 г.); «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (Екатеринбург, 2012 г., 2013 г., 2014 г.); «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении» (Юрга, 2013 г.); «Актуальные проблемы современного машиностроения» (Юрга, 2014 г.); «Оценка эффективности использования механизмов государственного регулирования, направленных на комплексное развитие моногородов Казахстана, России и Белоруссии» (Казахстан, г. Рудный, 2015 г.); «Современные тенденции и инновации в науке и производстве» (Междуреченск, 2014 г.); «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (Прокопьевск, 2014 г., 2016 г.); «Россия молодая» (Кемерово, 2014 г., 2016 г.); «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (Кемерово, 2014 г.); «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс-2014» (Кемерово, 2014 г.).

Публикации.

По результатам выполненных исследований опубликовано 15 работ, в том числе 6 в изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации.

Структура и объем работы.

Диссертация изложена на 158 страницах текста и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 149 наименований, списка иллюстративного материала и одного приложения. Диссертационная работа содержит 83 рисунка и 30 таблиц.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры Горных машин и комплексов КузГТУ, кафедры Горно-шахтного оборудования ЮТИ ТПУ, а также лично д.т.н. Аксенову В.В., к.т.н. Ананьеву К.А. за помощь и поддержку, оказанную при работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе проведен обзор устройств и методов формирования каналов в горных породах на поверхности и в подземных выработках. Рассмотрены методики расчета резцовых исполнительных органов, а также вопросы применения компьютерного моделирования для исследования параметров исполнительных органов.

Вопросами разработки и научного обоснования параметров и методик расчёта исполнительных органов проходческих и добычных машин занимались такие организации, как МГИ, НПИ, ИГД им. А.А. Скочинского, ЦНИИподземмаш, Гипроуглемаш, Донгипроуглемаш, КузПИ (КузГТУ) и др. Своими работами в области изучения механического разрушения горных пород известны ученые Л.И. Барон, А.И. Берон, В.А. Бреннер, Л.Б, Глатман, Л.И. Кантович, Н.Г. Картавый, В.В. Габов, А.Н. Коршунов, М.Г. Крапивин, Ю.Н. Линник, А.Б. Жабин, Е.З. Позин, М.М. Протодьяконов, В.И. Солод, В.И. Нестеров, Б.Л. Герике, А.А. Хорешок, Ю.А. Антонов, Н.И. Сысоев и др.

Разработке и совершенствованию ГВТ и геоходов посвящены работы В.В. Аксенова, В.Ф. Горбунова, А.Ф. Эллера, В.Д. Нагорного, А.А. Хорешка, В.Ю. Садовца, Н.Б. Пушкиной, В.Ю. Беглякова, М.Ю. Блащука, В.Ю. Тимофеева, Р.В. Чернухина и др.

В результате обзоров установлено, что разработка геоходов для пород средней крепости является перспективным направлением, а сдерживающим фактором является отсутствие обоснованных параметров и схемных решений ЗИО геохода. При этом существуют решения для формирования каналов в горных породах, а также методики расчета исполнительных органов проходческих машин, которые должны быть учтены при разработке ЗИО геоходов. Адаптацию методик расчета наиболее рационально производить с использованием современных методов компьютерного моделирования, что позволит эффективно определять параметры схемных решений.

Во втором разделе определены диапазоны значений высоты h_{κ} и ширины b_{κ} законтурных каналов, а также скоростей подачи ЗИО внешнего движителя (ВД, V_{nsd}) и ЗИО элементов противовращения (ЭП, V_{nsn}) геохода, обеспечивающих реализацию требуемой производительности геохода V_{nr} (рисунок 1). С учетом анализа условий работы ЗИО, общих требований к системам геохода, а также определенных диапазонов геометрических и кинематических параметров сформированы требования для ЗИО геохода, среди которых могут быть выделены:

- формирование канала заданного типоразмера (высота от 0,1 м до 0,4 м и отношение ширины канала к высоте от 1 до ¼);
- формирование канала со скоростью подачи ЗИО от 0,112 до 2,07 м/мин.





На основании сформированных требований и проведенного в первом разделе обзора варианты рабочих органов были систематизированы и приняты два принципиальных схемных решения для дальнейшего рассмотрения: дисковый и корончатый (рисунок 2).

Для корончатых ЗИО геометрические параметры определяются непосредственно параметрами канала: высота коронки равна высоте канала, а диаметр – ширине канала. Ширина дискового рабочего органа определяется шириной канала, а диаметр диска для схемных решений предварительно установлен в зависимости от высоты канала.



Рисунок 2 – Схемные решения дисковых и корончатых ЗИО

По принятым значениям нагрузок на резцах получена зависимость диаметра дискового ЗИО $D_{u.o.d}$, м от высоты законтурного канала:

$$D_{u.o.\partial} = 2h_{\kappa} + 0,2 \tag{1}$$

и установлена зависимость угла охвата от параметров канала и ЗИО:

$$\varphi_{oxs} = \operatorname{arctg}\left(\frac{2\left(\sqrt{h_{\kappa}(D_{3uo} - h_{\kappa})} + h_{max}\right)}{D_{3uo} - 2h_{\kappa}}\right), \qquad (2)$$

где h_{max} – максимальная глубина резания на резце, м;

*D*_{зио} – диаметр ЗИО, м.

В качестве инструмента для ЗИО геохода приняты резцы радиального типа с параметрами режущей части породного резца РП-3 для всех вариантов разрабатываемых схемных решений ЗИО.

Так как при работе ЗИО геохода в канале возможен режим блокированного резания, число линий резания определено для схемных решений с учетом уменьшенного шага резания, как для кутковых частей исполнительных органов проходческих комбайнов. Число резцов в линиях резания определено с использованием зависимостей максимальной требуемой скорости подачи ЗИО в канале от высоты канала и возможных скоростей подачи от диаметра ЗИО (рисунок 3).

Кривая "1 резец" (рисунок 3, а) отражает максимальную скорость подачи при одном резце в линии резания и ограничивает область, ниже которой возможна работа ЗИО с одним резцом в линии резания при принятых скорости резания и глубине резания. На основании анализа графиков установлено, что для корончатого ЗИО любых диаметров и высот каналов необходимая скорость подачи достигается при одном резце в линии резания. Исключения составляют диаметр геохода 5,6 м и высота канала свыше 0,31 м. В этом случае для реализации требуемой скорости подачи необходимо два резца в линии резания.

Для дисковых ЗИО (рисунок 3, б) области на графике между кривыми, обозначенными числом резцов, соответствуют максимальным скоростям подачи при числе резцов в линии резания соответствующему номеру кривой, ограничивающей область сверху. Требуемые скорости подачи дискового ЗИО ВД реализуются при числе резцов от одного до четырех для любых диаметров диска. При этом четыре резца в линии резания необходимо только для случая высоты канала более 0,35 м и диаметра геохода 5,6 м, во всех остальных случаях достаточно от одного до трех резцов в линии резания.

8



Рисунок 3 – Диаметр ЗИО и высота канала в зависимости от требуемых и возможных скоростей подачи корончатого ЗИО ВД (а) и дискового ЗИО ВД (б)

Так как ЗИО геохода имеют относительно невысокие скорости подачи (от 0,112 до 2,07 м/мин), для них не всегда обеспечивается коэффициент вариации крутящего момента (КВ) заданного уровня, что требует уточнения минимального общего числа резцов по данному условию.

Так как КВ является относительной величиной, характеризующей неравномерность крутящего момента, производить его оценку возможно на ранних этапах проектирования при выборе числа резцов. Установлено, что наибольшее влияние на КВ крутящего момента на ЗИО оказывают угол охвата и общее число резцов. Кроме того, на корончатом ЗИО значения КВ не превышают принятое по рекомендациям значение в 20 % при любом допустимом по условию обеспечения производительности числе резцов и их расстановке с равным отставанием, а для дискового ЗИО минимальное число резцов при КВ не более 20 % определяется в соответствии рисунком 4.



Рисунок 4 – Зависимость КВ на дисковом ЗИО от числа резцов при различных углах охвата ($\varphi_{_{OXB}}$)

Таким образом, для корончатого ЗИО схемы набора режущего инструмента определятся по условию обеспечения требуемой производительности, так как число резцов обеспечивает требуемый КВ. Для дискового ЗИО некоторые схемы набора резцов требуют увеличения числа резцов в линиях резания, так как общее число резцов оказывается меньше минимально установленного по условию обеспечения коэффициента вариации не более 20 %.

<u>В третьем разделе</u> представлены этапы разработки и верификации компьютерной модели для определения параметров ЗИО геохода, структурная схема которой (для разработки в среде Simulink) с основными необходимыми блоками представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Структурная схема модели ЗИО геохода для оценки схемных решений

Верификация модели по силовым параметрам произведена сравнением требуемых крутящих моментов, полученных в результате моделирования, со значениями, полученными по методике РД12.25.137-89, а также сравнением результирующих усилий от работы ЗИО. Установлено, что параметры, определенные по аналитическим зависимостям и компьютерной модели в среде MatLab/Simulink различаются не более чем на 4 %, а предложенная модель может быть использована для оценки схемных решений ЗИО геохода.

<u>Четвертый раздел</u> работы посвящен исследованию и сравнению основных кинематических, силовых и конструктивных параметров схемных решений, разработанных во втором разделе, с помощью компьютерной модели.

Износ режущего инструмента является одним из наиболее важных параметров при работе породоразрушающих исполнительных органов, определяющих как работоспособность конструкции, так и его экономическую эффективность. При прочих равных условиях износ инструмента определяется величиной суммарного пути трения резцов на ЗИО L_{mp} , м/м, которая может быть представлена в виде зависимости от площади канала:

$$L_{mp} = a_1 S_k , \qquad (3)$$

где *a*₁ – коэффициент, учитывающий тип ЗИО, глубину резания, ширину режущей кромки, угол охвата и характеризующий суммарный путь инструмента, м/м³;

 S_k – площадь поперечного сечения канала, м².

Значения суммарного пути трения резцов на ЗИО определялись с использованием средств Simulink при измерении координат резцов (рисунок 6).



Рисунок 6 – Зависимость суммарного пути трения резцов на ЗИО от площади законтурного канала

Для корончатых ЗИО значения коэффициента *a*₁ аппроксимируются с коэффициентом детерминации 0,997 выражением:

$$a_1 = a_1^{\kappa} = \frac{\pi}{2 h_{max} (b+1, 3 h_{max})}, \qquad (4)$$

где *b* – ширина режущей кромки, м.

Для дисковых ЗИО коэффициент a_1 имеет вид:

$$a_{1} = a_{1}^{\partial} = \frac{\varphi_{oxe}(\frac{0,1}{h_{\kappa}} + 1)}{h_{max}(b+1,3h_{max})}.$$
(5)

С помощью полученных выражений установлено, что суммарный путь режущего инструмента меньше на 10-38 % на корончатом ЗИО, чем на дисковом, при равных значениях максимальной глубины резания и площади сечения канала.

Крутящий момент в значительной степени определяет характеристики привода ЗИО и должен оцениваться при выборе схемных решений. Требуемые крутящие моменты на ЗИО представлены на рисунке 7 и описываются выражением вида:

$$M_{\kappa\rho} = a_2 S_k , \qquad (6)$$

где a_2 – коэффициент, учитывающий тип ЗИО, глубину резания, угол охвата, крепость породы, число резцов в линии резания и характеризующий крутящий момент на ЗИО, (Н·м)/м².



Рисунок 7 – Зависимость среднего значения требуемого крутящего момента на ЗИО от площади канала

Для корончатого ЗИО коэффициент *a*₂ примет вид:

$$a_{2}^{\kappa} = \frac{P_{max} n_{p.n}}{2 \pi (b+1, 3 h_{max})}, \qquad (7)$$

где P_{max} – максимальное усилие резания на единичном резце, H;

*п*_{*р.л*} – число резцов в линии резания, шт.

Для дискового ЗИО коэффициент a_2 определится как:

$$a_{2}^{\partial} = \frac{0.53 P_{max} n_{p.n}}{\pi (b+1.3 h_{max})}.$$
(8)

Значения коэффициента a_2 и его статистические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Значение коэффициентов уравнений a_2 в зависимости от числа резцов в линии резания ($n_{p.n}$), крепости пород по шкале Протодьяконова (f) и коэффициент детерминации (R^2)

Тип ЗИО	Корончатый			Дисковый		
<i>n</i> _{<i>p</i>.л}	-	1		2		3
<i>f</i> , ед.	3	5		3	5	
а ₂ , (Н∙м)/м²	13046	27794	55588	29853	63600	95400
R ²	0,96				0,97	

Удельная энергоемкость разрушения забоя позволяет оценить и сравнить энергоэффективность работы ЗИО. Для корончатого ЗИО с учетом зависимости (7) выражение для определения удельной энергоемкости запишется как:

$$H_{w}^{\kappa} = \frac{P_{max}}{h_{max}(b+1,3h_{max})} \,. \tag{9}$$

Для дискового ЗИО выражение примет вид:

$$H_{w}^{\partial} = \frac{1,06 P_{max}}{h_{max}(b+1,3h_{max})}.$$
 (10)

На основании анализа выражений (9) и (10) для определения удельной энергоемкости разрушения забоя установлено: при постоянных значениях максимальной глубины резания, крепости пород и геометрических параметрах режущего инструмента удельная энергоемкость разрушения забоя является постоянной и выше на дисковом ЗИО, чем на корончатом, на 6 %.

Оценка массовых и габаритных характеристик произведена для принятых компоновочных схем ЗИО с гидромотором без редуктора. По номенклатуре гидромоторов различных производителей были исследованы и установлены зависимости массы и габаритных размеров от номинального крутящего момента для 97 гидромоторов. Для рабочих органов определены габаритные размеры и теоретическая масса. Номинальный крутящий момент принят равным определенному ранее среднему требуемому крутящему моменту на ЗИО. Получена зависимость массы ЗИО с приводом от площади сечения законтурного канала при крепости пород f = 5 ед. по шкале Протодьяконова (рисунок 8).





Для крепости пород 3 и 4 ед. по шкале Протодьяконова зависимости массы ЗИО от площади канала были получены аналогично и представлены в таблице 2. В соответствии с рисунком 8 и таблицей 2 корончатые ЗИО обладают меньшей массой с приводом, чем дисковые, в 2,5–20 раз.

планых крепостих породы						
Крепость пород по шкале	Дисковый ЗИО	Корончатый ЗИО				
Протодьяконова, ед	Зависимость	R ²	Зависимость	R ²		
3	$m_{3uo}^{\partial} = 4115, 1S_{\kappa} + 159,22$		$m_{_{3uo}}^{\kappa}=1619,1S_{\kappa}$	0,96		
4	$m_{_{3uo}}^{\partial} = 4473,9 S_{\kappa} + 172,91$	0,88	$m_{_{3uo}}^{\kappa}=1904,5S_{\kappa}$	0,95		
5	$m_{3uo}^{\partial} = 4892, 4S_{\kappa} + 188,06$		$m_{_{3uo}}^{\kappa}=2237,6S_{\kappa}$	0,93		

Таблица 2 – Зависимости массы ЗИО от площади законтурного канала при различных крепостях породы

Габаритные характеристики оценивались с помощью зависимости выступа ($L_{выс}$, м) ЗИО с приводом во внутреннее пространство геохода от площади поперечного сечения законтурного канала. Он принимается равным величине выступа дискового рабочего органа при величине выступа дискового рабочего органа во внутреннее пространство геохода больше габаритного размера гидромотора. В таблице 3 представлены аппроксимирующие зависимости величины выступа ЗИО во внутреннее пространство геохода.

Таблица 3 — Зависимости выступа ЗИО с приводом во внутреннее пространство геохода от площади законтурного канала

Тип ЗИО	Крепость пород по шкале Протодьяконова, ед	Отношение высоты канала к его ширине	Зависимость	R ²	
Коронча- тый	3		$L_{\rm BLC} = 1,259 S_k + 0,097$		
	4	1,2,4	$L_{_{6blc}} = 1,457 S_k + 0,112$	0,91	
	5		$L_{_{Bblc}} = 1,639 S_k + 0,126$		
Дисковый		1	$L_{BBIC} = 0,946 S_k^{0,260}$	0.00	
	3, 4, 5	2	$L_{_{Bbc}} = 1,120 S_k^{0,256}$	0,99	
		4	$L_{\rm ebc} = 1,433 S_k^{0,275}$	1,00	

Анализ полученных зависимостей позволяет заключить: при равных значениях площади канала выступ дискового ЗИО с приводом во внутреннее пространство геохода в 2–4 раза больше, чем выступ корончатого ЗИО.

Для разработки конструкций креплений и опор приводов ЗИО, а также для оценки нагрузок, возникающих на трансмиссии геохода от работы ЗИО необходима оценка результирующих усилий. Влияние работы ЗИО на геоход оценивается тремя параметрами: моментом на секции геохода от работы ЗИО, осевым усилием на геоходе от работы ЗИО и результирующим усилием в плоскости, перпендикулярной оси вращения геохода. Для определения данных параметров при известных составляющих усилий по осям в системе координат ЗИО были получены выражения для дисковых и корончатых ЗИО ВД и ЗИО ЭП.

На рисунках 9 и 10 представлены результаты определения результирующих моментов и осевых усилий от работы двух ЗИО ВД и четырех ЗИО ЭП в зависимости от площади поперечного сечения законтурного канала (S_k , м²). При этом

для корончатых ЗИО возможны различные направления вращения, а для дискового направление вращения определено однозначно, по условию обеспечения попутного фрезерования, а также по условию выноса разрушенной породы из канала. Направления вращения корончатого ЗИО в принятых системах координат обозначены знаками "+" и "-" на рисунках 9 и 10.



• Корончатый (отрицательное напр.) • Корончатый (положительное напр.) • Дисковый Рисунок 9 – Результирующий момент и осевое усилие на головной секции геохода от работы двух ЗИО ВД

Для головной секции геохода и ЗИО ВД (рисунок 9) установлено, что момент на секции геохода от работы ЗИО ВД направлен против вращения геохода и линейно зависит от его радиуса для обоих типов ЗИО. Осевое усилие на геоходе от ЗИО ВД направлено против направления подачи геохода для дискового ЗИО и линейно зависит от числа ЗИО. Для корончатых ЗИО направление осевого усилия на геоходе определяется направлением вращения коронок. Осевое усилие на геоходе от корончатых ЗИО может быть частично скомпенсировано при четном числе коронок и противоположном направлении их вращения.

Для хвостовой секции геохода и ЗИО ЭП (рисунок 10) установлено, что момент на секции геохода от работы ЗИО ЭП для дискового ЗИО мал и может не учитываться, а для корончатого ЗИО определяется направлением вращения коронок и может быть полностью скомпенсирован при четном числе коронок. Осевое усилие на геоходе от ЗИО ЭП направлено против подачи геохода и имеет сопоставимые значения для дисковых и корончатых ЗИО.



 Корончатый (отрицательное напр.)
 Корончатый (положительное напр.)
 Дисковый Рисунок 10 – Результирующий момент и осевое усилие на хвостовой секции геохода от работы четырех ЗИО ЭП

На основании результатов диссертационных исследований разработана конструкторская документация и изготовлены ЗИО для опытного образца геохода диаметром 3,2 м (рисунок 11), основные параметры которых представлены в таблице 4.



Рисунок 11 – Опытный образец геохода (а), ЗИО ВД (б), ЗИО ЭП (г) и привод ЗИО (в)

16

Назначение ЗИО	Диаметр, м	Высота, м	Число резцов в линиях резания, шт	Число линий резания, шт	Частота вращения ЗИО, об/мин	Суммарный путь трения, м/м	Требуемый крутящий момент, Н·м	Удельная энергоемкость разрушения, кВт·ч/м ³	Момент на секции геохода от работы ЗИО, кН·м	Осевое усилие на геоходе от работы ЗИО, кН
ЭП	0.2	0,25	1	9	5,01	164,72	1,36	2.06	101,13	49,22
ВД	0,2	0,2		7	70,86	131,78	1,09	2,90	35,17	-20,8

Таблица 4 – Основные параметры ЗИО опытного образца геохода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены новые научно обоснованные технические решения законтурных исполнительных органов геохода для проведения выработок в породах средней крепости с целью создания новых горных машин и их элементов, обладающих повышенной производительностью, имеющие существенное значение для горного машиностроения.

В рамках проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Сформулированы требования к ЗИО, учитывающие возможные типоразмеры законтурных каналов (высота от 0,1 м до 0,4 м и отношение ширины канала к высоте от 1 до ¼), а также диапазон скоростей подачи ЗИО от 0,112 до 2,07 м/мин.

2. Приняты два принципиальных решения ЗИО для разработки схемных решений: дисковый и корончатый. Для принятого типоразмерного ряда каналов и принципиальных схемных решений обоснованы геометрические параметры ЗИО, рациональные параметры расстановки резцов, а также приняты параметры режущей части.

3. Обосновано, что на корончатом ЗИО требуемые скорости подачи реализуются при одном или двух резцах в линии резания, а коэффициент вариации крутящего момента не превышает 20 % при любом допустимом числе резцов. На дисковом ЗИО требуемые скорости подачи реализуются при числе резцов в линии резания от одного до четырех. Минимальное число резцов, обеспечивающее коэффициент вариации крутящего момента на дисковом ЗИО заданного уровня, зависит от угла охвата и снижается при его увеличении.

4. Предложена компьютерная математическая модель работы ЗИО, обеспечивающая относительную погрешность результатов моделирования в сравнении с результатами расчетов по аналитическим зависимостям не более 4 %. 5. Для хвостовой секции геохода и дискового ЗИО ЭП установлено, что момент на секции геохода от работы ЗИО мал и может не учитываться, а для корончатого ЗИО определяется направлением вращения коронок и может быть полностью компенсирован при четном числе коронок. Осевое усилие на геоходе от ЗИО ЭП направлено против подачи геохода.

6. Для головной секции геохода и ЗИО ВД установлено, что момент на секции геохода от работы ЗИО ВД направлен против вращения геохода и линейно зависит от его радиуса. Направление осевого усилия на геоходе от дискового ЗИО ВД встречно подаче геохода, а для корончатых ЗИО определяется направлением вращения коронок. Осевое усилие на геоходе от корончатых ЗИО может быть частично компенсировано при четном числе коронок.

7. Установлено, что корончатый ЗИО является более рациональным, чем дисковый, так как обладает в 2-3 раза меньшим крутящим моментом, в 2,5-20 раз меньшей массой с приводом, в 2-4 раза меньшим выступом во внутреннее пространство геохода, на 10-38 % меньшим износом режущего инструмента и на 6 % меньшей удельной энергоемкостью разрушения при одинаковых параметрах режущего инструмента, свойствах горных пород и производительности.

8. Определены параметры ЗИО ВД и ЗИО ЭП для опытного образца геохода, а также показана возможность обоснования параметров ЗИО геохода на основании представленных в работе зависимостей. Это позволило разработать конструкторскую документацию и создать ЗИО корончатого типа для опытного образца геохода диаметром 3,2 м.

Направления дальнейших исследований:

1. Экспериментальные натурные исследования работы корончатых ЗИО на опытном образце геохода.

2. Разработка схемных решений ЗИО комбинированных типов.

3. Исследование работы ЗИО геохода с учетом стохастических свойств геосреды.

4. Оценка результирующих усилий от работы ЗИО при проведении выработки через различные геологические нарушения.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Ермаков, А.Н.** Обоснование требований к исполнительным органам формирования законтурных каналов геохода / **А.Н. Ермаков**, В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, К.А. Ананьев // Вестн. кузбасского гос. техн. ун-та. — 2014. — № 2(102). — С. 5-7.

2. **Ермаков, А.Н.** Обзор существующих решений исполнительных органов для формирования каналов за контурами выработки / **А.Н. Ермаков**, В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, К.А. Ананьев // ГИАБ. — 2014. — № 12. — С. 20-24.

3. Нестеров, В.И. Сравнение износа режущего инструмента на законтурных исполнительных органах геоходов/ В.И. Нестеров, **А.Н. Ермаков** // Горное оборудование и электромеханика. — 2015. — № 7. — С. 41-45.

4. Аксенов, В.В. Определение силовых и кинематических параметров исполнительных органов геохода методом имитационного моделирования / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, К.А. Ананьев, **А.Н. Ермаков** // Вестн. кузбасского гос. техн. ун-та. — 2016. — № 1. — С. 77-82.

5. Аксенов, В.В. Оценка возможности применения методов имитационного моделирования для определения параметров законтурных исполнительных органов геохода / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, К.А. Ананьев, **А.Н. Ермаков** // ГИАБ. — 2016. — № 2. — С. 145-152.

6. **Ермаков, А.Н.** Оценка коэффициента вариации крутящего момента на законтурных исполнительных органах геохода / **А.Н. Ермаков** // Горное оборудование и электромеханика. — 2016. — № 8. — С. 25-29.

Статьи в прочих изданиях

7. Ананьев, К.А. Требования к исполнительным органам геоходов / К.А. Ананьев, **А.Н. Ермаков**, В.Ю. Садовец // VI Всероссийская, 59 науч.-практическая конф. молодых учёных с международным участием «Россия молодая». — Кемерово: КузГТУ, 2014. — С. 8.

8. Аксенов, В.В. Обзор и анализ методик определения параметров резцовых исполнительных органов / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, К.А. Ананьев, **А.Н. Ерма-ков** // сб. тр. XVI Междунар. науч.-практической конф. «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». — Кемерово, 2014. — С. 92-94.

9. Ананьев, К.А. Варианты создания уширений горной выработки барабанными исполнительными органами геоходов / К.А. Ананьев, К.А. Жигулина, **А.Н. Ермаков** // Оценка эффективности использования механизмов государственного регулирования, направленных на комплексное развитие моногородов Казахстана, России и Белоруссии: сб. докл. междунар. науч.-практической конф. молодых ученых и студентов. — Рудный: Рудненский индустриальный институт, 2015. — С. 102-105.

10. Аксенов, В.В. Возможности законтурных исполнительных органов геохода по формированию различных профилей каналов / В.В. Аксенов, К.А. Ананьев, **А.Н. Ермаков** // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы III междунар. науч.-практической конф.. — Междуреченск, 2-4 апреля 2014 г. — Кемерово, 2014 — С. 12-13.

11. Ермаков, А.Н. Обзор существующих решений режущих исполнительных органов для формирования каналов за контурами выработки / А. Н. Ермаков, В. В. Аксёнов, А. А. Хорешок, К. А. Ананьев // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: сб. тр. IV междунар. науч.-практической конф.. — Прокопьевск: изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2014. — С. 290-295. 12. Аксенов, В.В. Кинематическая модель дискового исполнительного органа формирования законтурных каналов для внешнего движителя геохода / В.В. Аксёнов, А.А. Хорешок, К.А. Ананьев, **А.Н. Ермаков** // Актуальные проблемы современного машиностроения: сб. тр. междунар. науч.-практической конф. (11-12 декабря 2014 г.) Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014 — С. 68-72.

13. Ермаков, А.Н. Оценка применимости баровых исполнительных органов для геоходов / А.Н. Ермаков, А.В. Дементьев // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: сб. тр. IV Всероссийской науч.-практической конф. с элементами научной школы для студентов и учащейся молодёжи (04-06 апреля 2013) Юргинский технологический институт. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. — С. 160-162.

14. Аксенов, В.В. Определение глубины резания дискового законтурного исполнительного органа внешнего движителя геохода / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, К.А. Ананьев, **А.Н. Ермаков** // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2014. Материалы XV междунар. науч.-практической конф. Кемерово. 2014. — С. 54.

15. **Ермаков, А.Н.** Оценка требуемой скорости подачи законтурных исполнительных органов геохода / **А.Н. Ермаков** // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: сб. тр. V междунар. науч.-практической конф.. — Прокопьевск: изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2016. — С. 237-240.

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

[1, 10, 12-14] — выполнение основного объема исследований, обработка полученных результатов, формулировка выводов;

[2, 9, 11] – проведение аналитического обзора, формулировка выводов;

[3] – проведение теоретических исследований, формулировка выводов;

[4, 5] – постановка задачи, разработка модели, обработка полученных результатов, формулировка выводов;

[7, 8] – постановка задачи, проведение аналитического обзора.

Подписано к печати 01.12.2016 г. Формат 64х84/16 Уч.-изд. л. 1.0 Тираж 100 экз. Заказ _____

Отпечатано в издательском центре УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.