

На правах рукописи



Пашков Дмитрий Алексеевич

**ОБОСНОВАНИЕ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ГЕОХОДА
ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ МЯГКИХ ПОРОД**

Специальность 05.05.06 - «Горные машины»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2021

Работа выполнена в Институте угля Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» и ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель: **Аксенов Владимир Валерьевич**,
доктор технических наук, главный научный сотрудник
ФИЦ УУХ СО РАН

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

Карпов Владимир Николаевич,
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук», старший научный сотрудник (г. Новосибирск)

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

Защита состоится «01» июля 2021 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Факс (3842) 68-23-23, e-mail: haa.omit@kuzstu.ru

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

<http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2021/pas/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Непша Федор Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Сегодня во всем мире наблюдается увеличение объемов и масштабов использования подземного пространства. Это вызвано увеличением количества населения, а также непрерывным ростом количества автомобильного парка, которые являются причинами проблем современного общества.

Перспективным направлением технологии строительства подземных выработок и сооружений, является применение геолодической технологии, в основе которой используется геосреда для создания напорных усилий и силы тяги у проходческого агрегата. Базовым элементом технологии является геолод, представляющий собой новый класс горных машин.

В технологическом процессе строительства подземных сооружений одним из основных является процесс отделения породы забоя от массива. Разрушение горных пород в забое осуществляет исполнительный орган (ИО) проходческого агрегата.

Подземные сооружения, как правило, строятся на небольших глубинах, которым характерны мягкие породы с коэффициентом крепости до $f = 1$ ед. по шкале М. М. Протоdjяконова.

При разработке ИО геолода для разрушения мягких пород сдерживающим фактором является отсутствие научно-технических и научно-методических разработок направленных на обоснование силовых и энергетических параметров ИО.

Вследствие этого, работа, направленная на обоснование силовых и энергетических параметров исполнительных органов геолода для разрушения мягких пород, является актуальной.

Степень разработанности.

Исследованием ИО геолода занимались В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, К.А. Ананьев, А.Н. Ермаков, Н.Б. Пушкина, В.Ю. Бегляков и др. В результате проведенных исследований определены параметры ножевых исполнительных органов геолода с прямой формой режущей кромки ножа, определен ряд кинематических и силовых параметров барабанного исполнительного органа, обоснованы параметры замкнутых исполнительных органов геолодов для разрушения пород средней крепости, обоснована рациональная форма поверхности взаимодействия ИО геолода с породой на основании смещения значений главных напряжений в породе забоя в сторону растяжения.

В работах Аксенова В.В. и Садовца В.Ю. не рассматривалось:

- влияние формы режущей кромки ножа на силовые параметры ИО геолода для разрушения мягких пород;
- влияние параметров ножевых ИО геолода на энергоемкость разрушения породы забоя ИО геолода.

Цель работы: обоснование силовых и энергетических параметров ИО геолода для разрушения мягких пород.

Идея работы – для оценки, определения и расчета силовых и энергетических параметров исполнительных органов геолода для разрушения мягких пород использовать взаимосвязь между параметрами кривизны режущих кромок ножей и выпуклости поверхности забоя.

Для достижения поставленной цели, в диссертации сформулированы и решены взаимосвязанные **задачи:**

- 1) Разработка схемных решений ИО геохода для разрушения мягких пород.
- 2) Усовершенствование математической модели взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя.
- 3) Определение влияния конструктивных решений ИО геохода на силовые и энергетические параметры взаимодействия его с породой забоя.
- 4) Разработка ножевого исполнительного органа демонстрационного образца геохода.

Методы исследования.

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

- методы синтеза технических решений;
- метод многокритериального анализа;
- 3D-моделирование с использованием программного комплекса SolidWorks;
- теории механического разрушения горных пород и резания грунтов;
- метод программирования с использованием программного пакета MSExcel.

На защиту выносятся следующие результаты и положения:

- усовершенствованная математическая модель взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя, которая содержит систему аналитических уравнений для определения усилий резания и энергоемкости процесса разрушения, включая параметры кривизны режущих кромок ножей исполнительного органа геохода;

- увеличение количества лучей в диапазоне от 2 до 8 шт. обеспечивает снижение силовых и энергетических параметров взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя, при угле подъема винтовой линии движителя равном $9,0^\circ$, до 20%;

- кривизна режущей кромки ножей ИО геохода при полувыпуклой и выпуклой форме обеспечивает, по сравнению с прямолинейной формой режущей кромки ножей, снижение уровня силовых и энергетических параметров до 6% и до 13% соответственно.

Достоверность.

Научные результаты, положения, выводы и рекомендации сформулированные в диссертационной работе, обеспечиваются корректностью принятых допущений при разработке методики определения силовых и энергетических параметров взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя, использованием апробированных методов и фундаментальных положений механики, математики и теории резания грунтов.

Научная новизна работы:

- разработаны схемные и конструктивные решения ИО геохода для разрушения мягких пород с различными формами режущей кромки ножа;

- получены аналитические системы выражений для определения усилий резания при различных формах режущей кромки ножа, учитывающие геометрические параметры ножевого ИО и параметры геосреды;

- получено аналитическое выражение для определения энергоемкости разрушения породы забоя, учитывающее геометрические параметры ножевого ИО и параметры геосреды;

- усовершенствована математическая модель взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя с учетом различных его конструктивных вариантов;

- установлены зависимости влияния конструктивных решений на силовые и энергетические параметры ножевого ИО геохода для разрушения мягких пород.

Теоретическая значимость работы.

Полученные аналитические системы выражений и усовершенствованная математическая модель позволяют проводить исследования взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя.

Практическая значимость работы.

Схемные и конструктивные решения ножевых ИО геохода, а также усовершенствованная математическая модель взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя могут быть использованы в проектно-конструкторских организациях, занимающихся разработкой горнопроходческой техники, а также при обучении студентов по направлениям подготовки, связанных с проектированием горных машин.

Личный вклад автора заключается:

- в разработке схемных и конструктивных решений ИО геохода для разрушения мягких пород;

- в получениях аналитических систем выражений для определения усилий резания при различных формах режущей кромки ножа, учитывающих геометрические параметры ножевого ИО и параметры геосреды;

- в получении аналитического выражения для определения энергоемкости разрушения породы забоя, учитывающее геометрические параметры ножевого ИО и параметры геосреды;

- в совершенствовании математической модели взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя, учитывающей различные его конструктивные варианты (формы режущей кромки ножа);

- в разработке ИО демонстрационного образца геохода.

Реализация выводов и рекомендаций работы.

Результаты работы были использованы при выполнении проекта «Разработка проходческого подземного аппарата класса «Геоход», выполняемый в ООО "Сибирское НПО".

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на научно-практических конференциях: международном горном симпозиуме «Инновационные технологии в горном деле и образовании» (Кемерово, 2017 г., 2019 г., 2020 г.); «Инновации в технике и технологиях» (Великий Новгород, 2018 г., 2019 г., 2020 г.); «Инновационные технологии в машиностроении» (Юрга, 2018 г., 2019 г.); «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (Прокопьевск, 2018 г., 2020 г.); «Россия молодая» (Кемерово, 2019 г., 2020 г.); «Инновации в технологиях и образовании» (Белово, 2018 г., 2020 г.); «Современные тенденции и инновации в науке и производстве» (Междуреченск, 2020 г.).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано всего 27 научных работ, в том числе 5 в изданиях, рекомендованных ВАК и 9 в изданиях, индексируемых в базе SCOPUS и Web of Science, получен 1 патент РФ.

Объем и структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и одного приложения, изложенных на 176 страницах машинописного текста, содержащих 81 рисунок, 25 таблиц, список литературы из 111 наименований.

Автор выражает благодарность за помощь и поддержку, оказанную при работе над диссертацией, к.т.н. Садовцу В.Ю. и к.т.н. Прейс Е.В.

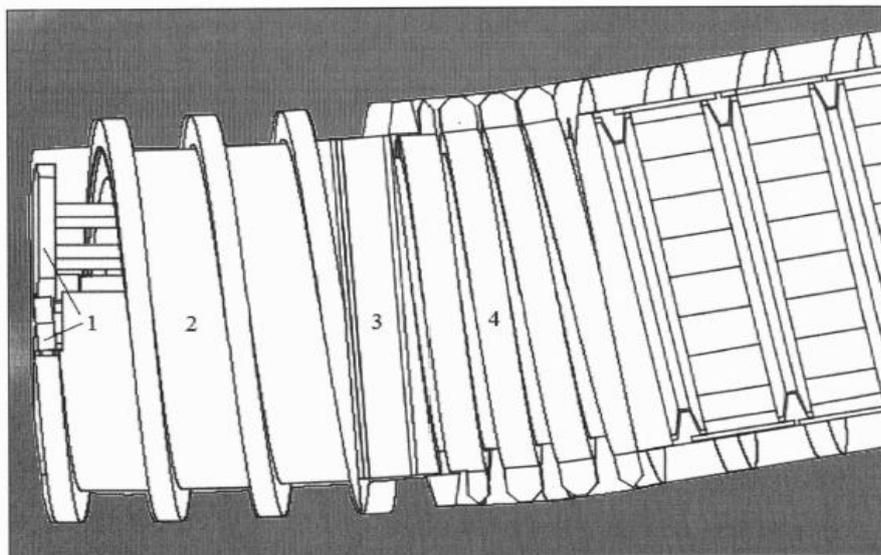
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень её разработанности, определена цель и взаимосвязанные задачи для ее достижения, сформулирована научная новизна работы и личный вклад автора, описана теоретическая и практическая значимость.

В первой главе рассмотрена тенденция строительства подземных объектов различного назначения в мире. Приведены общие сведения о геоходах, включая особенности работы ИО и предъявляемые к нему требования. Проведен обзор ИО для разрушения мягких пород, а также методик определения сил резания ножевым ИО и методик определения энергоемкости разрушения горных пород. Рассмотрен метод многокритериального анализа – TOPSIS.

Во второй главе представлено техническое решение геохода (Рисунок 1), отличительной особенностью которого является изгибающийся корпус. С учетом которого дополнены особенности работы ИО геохода. Сформированы дополнительные специальные требования к ИО геохода. Основными из которых являются:

- ИО геохода должен формировать форму забоя, не препятствующую изгибанию корпуса;
- работа ИО геохода должна обеспечивать разрушение забоя в заданном направлении.

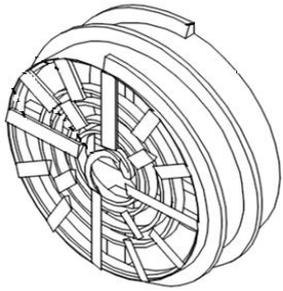
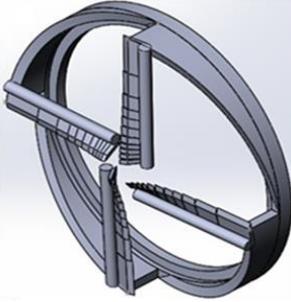
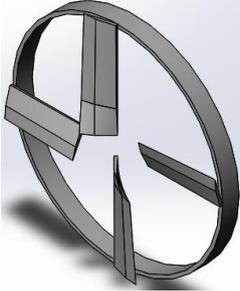
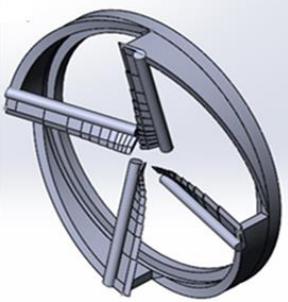
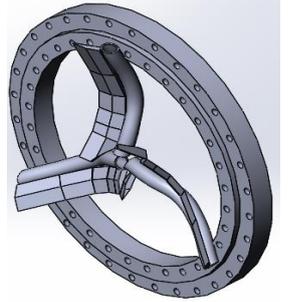
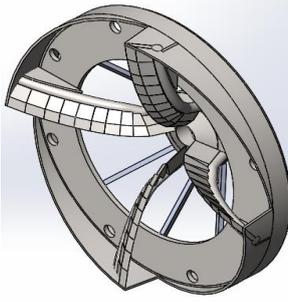
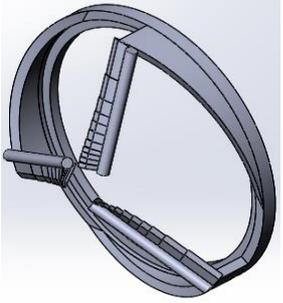


1 – исполнительный орган; 2 – головная секция; 3 – промежуточная секция; 4 – хвостовая секция

Рисунок 1 – Общий вид геохода с изгибающимся корпусом

На основании особенностей работы ИО геохода и предъявляемым к нему требованиям разработаны схемные решения ИО геохода для разрушения мягких пород. Основные из которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Схемные решения ножевых ИО геохода

Прямое расположение относительно поверхности забоя			
Схема			
Наименование	с разным числом режущих элементов относительно центра вращения геохода с прямой формой режущей кромки ножа	геликоидный с прямой формой режущей кромки ножа	геликоидный с разным числом режущих элементов относительно центра вращения геохода с прямой формой режущей кромки ножа
Индекс	AA1	AA2	AA3
Вогнутое расположение относительно поверхности забоя			
Схема			
Наименование	геликоидный с наклонной формой режущей кромки ножа	геликоидный с вогнутой формой режущей кромки ножа	геликоидный с полувогнутой формой режущей кромки ножа
Индекс	AA4	AA5	AA6
Выпуклое расположение относительно поверхности забоя			
Схема			
Наименование	геликоидный с наклонной формой режущей кромки ножа	геликоидный с выпуклой формой режущей кромки ножа	геликоидный с полувыпуклой формой режущей кромки ножа
Индекс	AA7	AA8	AA9

С учетом множества схемных решений ножевых ИО геохода разработана их классификация (Рисунок 2).

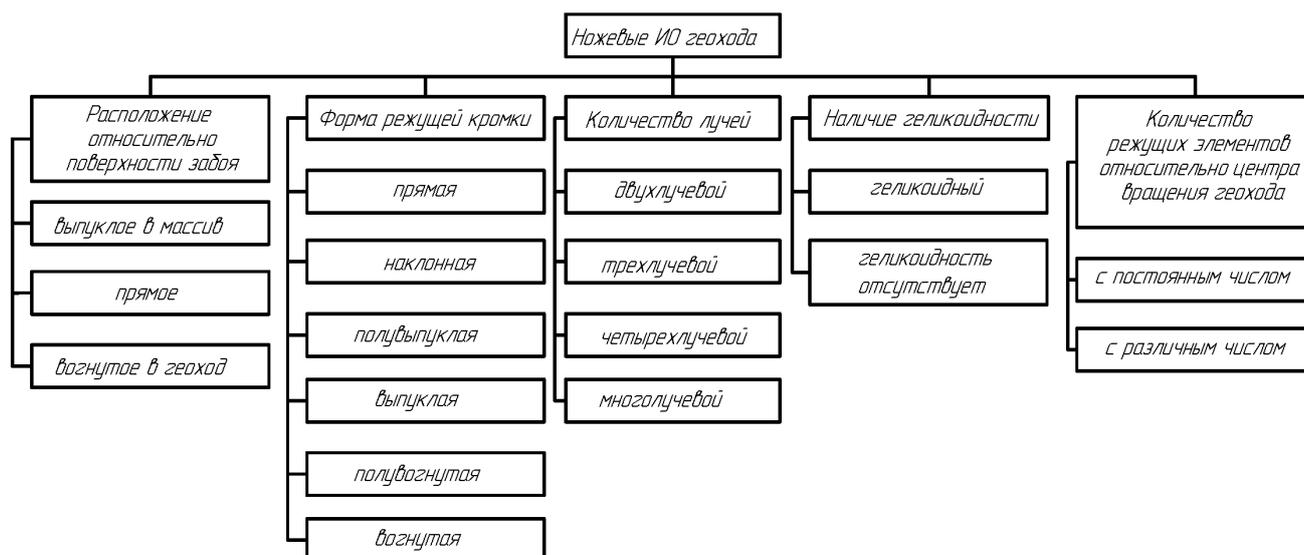


Рисунок 2 – Классификация ножевых ИО геохода для разрушения мягких пород

Оценка соответствия разработанных схемных решений ИО предъявляемым к ним требованиям проведена при помощи метода многокритериального анализа TOPSIS. Исходными данными для выбора схемного решения ИО геохода методом TOPSIS является матрица решений, включающая в себя оценки альтернатив по критериям, а также веса критериев. Альтернативами в данном случае являются варианты схемных решений ИО геохода (Таблица 1), а критериями служат требования к ним.

Установлено, что схемными решениями ИО геохода, наиболее полно удовлетворяющими предъявляемым к ним требованиям, являются:

- вогнутый геликоидный с наклонной формой режущей кромки ножа (АА4);
- геликоидный с выпуклой формой режущей кромки ножа (АА8);
- геликоидный с полувыпуклой формой режущей кромки ножа (АА9).

Схемные решения ножевых ИО геохода, наиболее полно удовлетворяющие предъявляемым к ним требованиям приняты к дальнейшему исследованию.

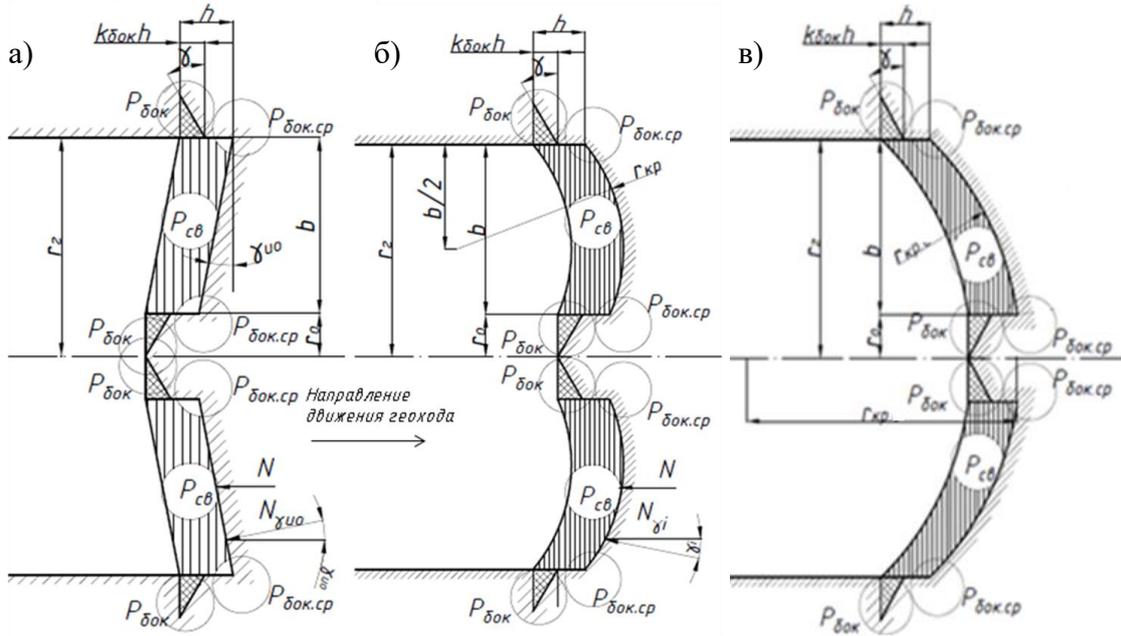
При решении первой задачи выявлены особенности работы ИО геохода с изгибающимся корпусом, сформированы дополнительные специальные требования к ИО, разработаны схемные решения ножевых ИО и проведен их анализ на соответствие предъявляемым к ним требованиям.

Представленные выводы являются итогами решения первой поставленной в диссертационной работе задачи – «Разработать схемные решения ИО геохода для разрушения мягких пород».

В третьей главе произведено усовершенствование математической модели взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя, учитывающее криволинейную форму режущей кромки ножа.

На основании схем действия сил резания ножевым ИО геохода с различными формами режущей кромки ножа (Рисунок 3), выявлены геометрические параметры конструктивных решений ножевых ИО геохода для разрушения мягких пород. К геометрическим параметрам конструктивных решений ИО геохода относятся r_2 – радиус головной секции геохода, r_0 – радиус образующей, $h_в$ – шаг внешнего движителя, n – количество лучей на ИО геохода, $\gamma_{но}$ – угол наклона ножа при наклонной форме ре-

жущей кромки ножа, $r_{кр}$ – радиус кривизны режущей кромки при полувыпуклой и выпуклой форме ножа.



h – глубина резания; $k_{бок}$ – коэффициент глубины расширяющей части прорези; γ – угол наклона расширяющей части прорези к горизонту; $P_{св}$ – силы для преодоления сопротивления грунта передней гранью ножа; $P_{бок}$ – силы для преодоления сопротивлений грунта разрушению в боковых расширениях прорези; $P_{бок.ср}$ – силы для преодоления сопротивлений грунта срезу боковыми ребрами ножа у дна прорези

Рисунок 3 – Схемы действия сил резания ножевым ИО геохода с наклонной (а), выпуклой (б) и полувыпуклой (в) формами режущей кромки ножа

Определены силы резания ножевым ИО при различных формах режущей кромки ножа. Для этого приняты следующие допущения: углубление ножа в массив происходит на всю глубину резания и нож формирует поверхность забоя, соответствующую форме режущей кромки ножа.

Форма режущей кромки ножа оказывает влияние на силу для преодоления сопротивления грунта передней гранью ножа ($P_{св}$) (Рисунок 4), которая равна произведению параметров геосреды на площадь среза.

Из Рисунка 5, фигуры 1 и 3 – круговые сегменты, фигуры 2 и 3 образуют вместе прямоугольник со сторонами b и h . Фигуры 1 и 3 являются равными, так как фигура 3 представляет собой фигуру 1 при предыдущем срезе.

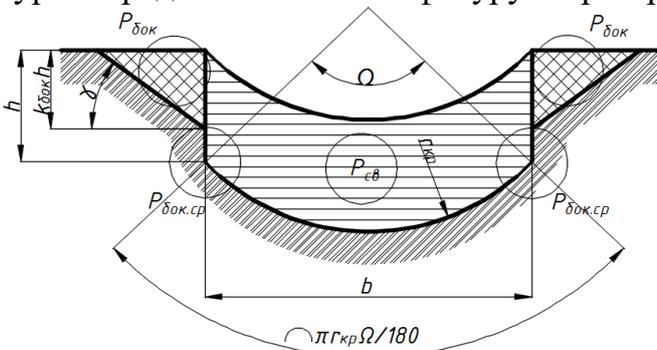


Рисунок 4 – Схема действия сил резания ножевым ИО с выпуклой формой режущей кромки ножа

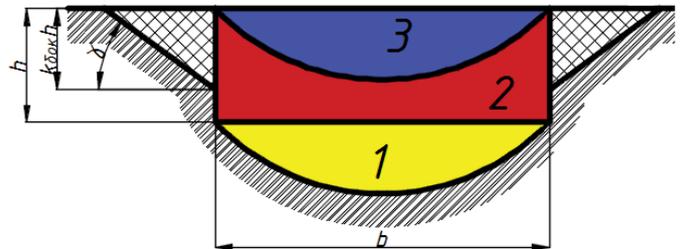


Рисунок 5 – Элементарные фигуры, образующие срез выпуклой формой режущей кромки ножа

При наклонной форме режущей кромки ножа (Рисунок 6), площадь среза равна произведению высоты параллелограмма на основание.

Таким образом, форма режущей кромки ножа не влияет на касательную составляющую силы резания.

Нормальная сила резания из схем (Рисунок 7) зависит от формы режущей кромки ножа и будет определяться из выражений (1) и (2) при выпуклой и полувыпуклой форме, и по выражениям (3) и (4) при наклонной.

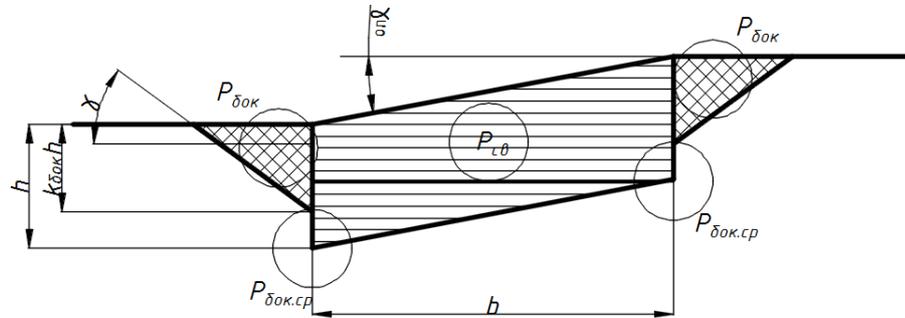


Рисунок 6 – Схема действия сил резания ножевым ИО с наклонной формой режущей кромкой при наклоне на угол $\gamma_{ио}$

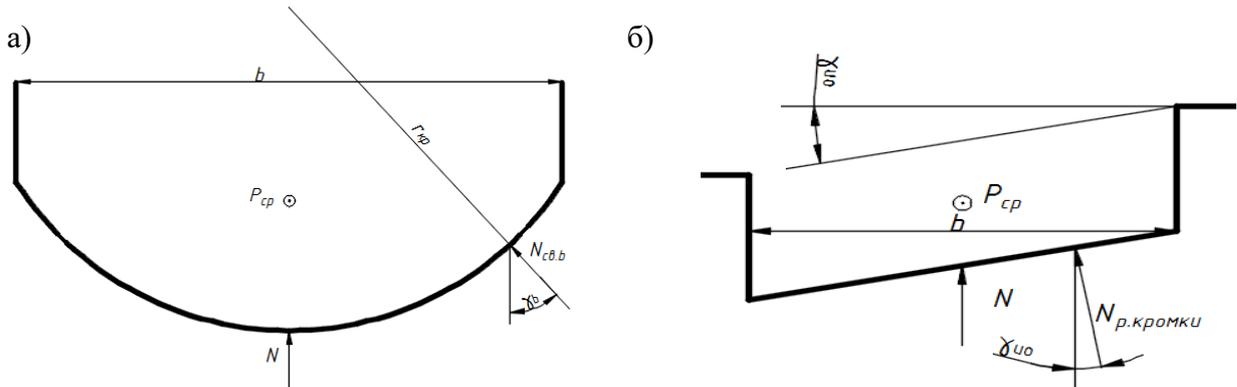


Рисунок 7 – Схемы для определения нормальной силы резания для ножа с выпуклой (а) и наклонной (б) формами режущей кромки ножа

$$dN_{св} = ctg(\delta + \varphi_{ТР}) \cos(\gamma_b) \varphi m_{св} h db ; \quad (1)$$

$$N_{бок.общ.} = ctg(\delta + \varphi_{ТР}) P_{бок.общ.} , \quad (2)$$

где δ – угол резания, град; $\varphi_{ТР}$ – угол трения грунта о нож, град; γ_b – угол наклона участка db режущей кромки, град; φ – коэффициент, учитывающий влияние угла резания; $m_{св}$ – удельная сила резания в лобовой части прорези при угле резания 45° , Н/м²; $P_{бок.общ.}$ – касательная составляющая силы резания, независящая от ширины среза, Н.

$$N_{св} = ctg(\delta + \varphi_{ТР}) \cos(\gamma_{ио}) \varphi m_{св} hb ; \quad (3)$$

$$N_{бок.общ.} = ctg(\delta + \varphi_{ТР}) P_{бок.общ.} . \quad (4)$$

Получены аналитические выражения для определения проекции составляющей силы сопротивления резанию, независящей от ширины среза, на ось вращения геохода (5) и плоскость, перпендикулярную оси вращения (6), а также момент сопротивления резанию от этой составляющей (7) при любой форме режущей кромки ножа:

$$P_{o.\dot{\text{бок}}} = \frac{h_B}{n} \sum_{i=1}^2 \left(m_{\dot{\text{бок}}} \frac{h_B}{n} \cos \beta_i + m_{\dot{\text{бок.ср}}} \right) \left(\frac{\sin 2\beta_i}{2} - \text{ctg}(\delta + \varphi_{mp}) \cos^2 \beta_i \right); \quad (5)$$

$$R_{u.o.\dot{\text{бок}}} = \frac{h_B}{n} \sum_{i=2}^2 \left(m_{\dot{\text{бок}}} \frac{h_B}{n} \cos \beta_i + m_{\dot{\text{бок.ср}}} \right) \left(\cos^2 \beta_i + \text{ctg}(\delta + \varphi_{mp}) \frac{\sin 2\beta_i}{2} \right); \quad (6)$$

$$M_{u.o.\dot{\text{бок}}} = \frac{h_B r_2}{n} \left(m_{\dot{\text{бок}}} \frac{h_B}{n} \cos \beta_1 + m_{\dot{\text{бок.ср}}} \right) \left(\cos^2 \beta_1 + \text{ctg}(\delta + \varphi_{mp}) \frac{\sin 2\beta_1}{2} \right) + \\ + \frac{h_B r_o}{n} \left(m_{\dot{\text{бок}}} \frac{h_B}{n} \cos \beta_2 + m_{\dot{\text{бок.ср}}} \right) \left(\cos^2 \beta_2 + \text{ctg}(\delta + \varphi_{mp}) \frac{\sin 2\beta_2}{2} \right). \quad (7)$$

где $m_{\dot{\text{бок}}}$ – сила разрушения грунта в боковых частях прорези, Н/м²; $m_{\dot{\text{бок.ср}}}$ – удельная сила среза одним из боковых ребер ножа, Н/м; β_1 – угол перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_2 ; β_2 – угол перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_o .

Получены аналитические выражения для определения проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения геохода (8) и плоскость, перпендикулярную оси вращения (9), а также момент сопротивления резанию от этой составляющей (10) при прямой форме режущей кромки ножа:

$$P_{o.c\dot{\text{в}}} = \varphi m_{c\dot{\text{в}}} \frac{h_g}{n} \left(\frac{h_g}{2\pi} \ln \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) - \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \left(r_2 - r_o + \frac{h_g}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) \right); \quad (8)$$

$$R_{u.o.c\dot{\text{в}}} = \varphi m_{c\dot{\text{в}}} \frac{h_g}{n} \left(\left(r_2 - r_o + \frac{h_g}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) + \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \frac{h_g}{2\pi} \ln \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) \right); \quad (9)$$

$$M_{u.o.c\dot{\text{в}}} = \varphi m_{c\dot{\text{в}}} \frac{h_g^2}{2\pi n} \left(\frac{h_g}{2\pi} \left(\frac{\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1}{2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_2} + \ln \left(\frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \right) \right) + \right. \\ \left. + \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \left((r_2 - r_o) + \frac{h_g}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) \right). \quad (10)$$

Получены аналитические выражения для определения усилий резания, зависящие от ширины среза, с наклонной формой режущей кромки:

$$P_{o.c\dot{\text{в}}} = \varphi m_{c\dot{\text{в}}} \frac{h_g}{n} \left(\frac{h_g}{2\pi} \ln \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) - \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_{uo}) \left(r_2 - r_o + \frac{h_g}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) \right); \quad (11)$$

$$R_{u.o.c\dot{\text{в}}} = \varphi m_{c\dot{\text{в}}} \frac{h_g}{n} \left(\left(r_2 - r_o + \frac{h_g}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) + \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_{uo}) \frac{h_g}{2\pi} \ln \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) \right); \quad (12)$$

$$M_{u.o.c\dot{\text{в}}} = \varphi m_{c\dot{\text{в}}} \frac{h_g^2}{2\pi n} \left(\frac{h_g}{2\pi} \left(\frac{\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1}{2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_2} + \ln \left(\frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \right) \right) + \right. \\ \left. + \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_{uo}) \left((r_2 - r_o) + \frac{h_g}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) \right). \quad (13)$$

Получены аналитические выражения для определения проекции составляющей силы сопротивления резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения геохода (14) и плоскость, перпендикулярную оси вращения (15), а также момент сопротивления резанию от этой составляющей (16) при полувыпуклой форме режущей кромки ножа:

$$P_{o.cв} = \phi m_{cв} \frac{h_6}{n} \left(\frac{h_6}{2\pi} \ln \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) - \frac{ctg(\delta + \phi_{TP})}{r_{кр}} \left(\frac{r_2}{2} \sqrt{r_{кр}^2 - r_2^2} - \frac{r_o}{2} \sqrt{r_{кр}^2 - r_o^2} + \left(\frac{r_{кр}^2}{2} + \frac{h_6^2}{4\pi^2} \right) \left(\arcsin \left(\frac{r_2}{r_{кр}} \right) - \arcsin \left(\frac{r_o}{r_{кр}} \right) \right) - \frac{h_6}{2\pi} r_{кр} \sqrt{1 + \left(\frac{h_6}{2\pi r_{кр}} \right)^2} \left(\arctg \frac{2\pi r_2 \sqrt{r_{кр}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2}}{h_6 \sqrt{r_{кр}^2 - r_2^2}} - \arctg \frac{2\pi r_o \sqrt{r_{кр}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2}}{h_6 \sqrt{r_{кр}^2 - r_o^2}} \right) \right) \right); \quad (14)$$

$$R_{u.o.cв} = \phi m_{cв} \frac{h_6}{n} \left(\left(r_2 - r_o + \frac{h_6}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) + ctg(\delta + \phi_{TP}) \frac{h_6}{2\pi r_{кр}} \times \left(\sqrt{r_{кр}^2 - r_2^2} - \sqrt{r_{кр}^2 - r_o^2} - \sqrt{r_{кр}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2} \ln \left(\frac{\left(\sqrt{r_{кр}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2} + \sqrt{r_{кр}^2 - r_2^2} \right) \sqrt{r_o^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2}}{\sqrt{r_2^2 + \frac{h_6^2}{2\pi} \left(\sqrt{r_{кр}^2 + \frac{h_6^2}{2\pi}} + \sqrt{r_{кр}^2 - r_o^2} \right)}} \right) \right) \right); \quad (15)$$

$$M_{u.o.cв} = \phi m_{cв} \frac{h_6^2}{2\pi n} \left(\frac{h_6}{2\pi} \left(\frac{\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1}{2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_2} + \ln \left(\frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \right) \right) + \frac{ctg(\delta + \phi_{TP})}{r_{кр}} \times \left(\frac{r_2}{2} \sqrt{r_{кр}^2 - r_2^2} - \frac{r_o}{2} \sqrt{r_{кр}^2 - r_o^2} + \left(\frac{r_{кр}^2}{2} + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2 \right) \left(\arcsin \left(\frac{r_2}{r_{кр}} \right) - \arcsin \left(\frac{r_o}{r_{кр}} \right) \right) - \frac{h_6}{2\pi} r_{кр} \sqrt{1 + \left(\frac{h_6}{2\pi r_{кр}} \right)^2} \left(\arctg \frac{2\pi r_2 \sqrt{r_{кр}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2}}{h_6 \sqrt{r_{кр}^2 - r_2^2}} - \arctg \frac{2\pi r_o \sqrt{r_{кр}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2}}{h_6 \sqrt{r_{кр}^2 - r_o^2}} \right) \right) \right). \quad (16)$$

Получены аналитические выражения для определения проекции составляющей силы сопротивления резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения геохода (17) и плоскость, перпендикулярную оси вращения (18), а также момент сопротивления резанию от этой составляющей (19) при выпуклой форме режущей кромки ножа:

$$P_{o.cв} = \varphi m_{cв} \frac{h_6}{r_{кр} n} \left(\frac{h_6}{2\pi} \ln \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) - ctg(\delta + \varphi_{TP}) \left(\frac{r_2 - r_o}{2} \sqrt{r_{кр}^2 - \left(\frac{r_2 - r_o}{2} \right)^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(r_{кр}^2 + \frac{h_6^2}{2\pi^2} \right) \arcsin \left(\frac{r_2 - r_o}{2r_{кр}} \right) - \frac{h_6}{\pi} r_{кр} \sqrt{1 + \left(\frac{h_6}{2\pi r_{кр}} \right)^2} \arctg \left(\frac{\pi(r_2 - r_o) \sqrt{r_{кр}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2}}{h_6 \sqrt{r_{кр}^2 - \left(\frac{r_2 - r_o}{2} \right)^2}} \right) \right) \right); \quad (17)$$

$$R_{u.o.cв} = \varphi m_{cв} \frac{h_6}{n} \left(\left(r_2 - r_o + \frac{h_6}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) + ctg(\delta + \varphi_{TP}) \frac{h_6}{2\pi r_{кр}} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{r_2 - r_o}{2} \right) \sqrt{r_{кр}^2 + \frac{h_6^2}{2\pi^2}} \ln \left(\frac{\left(\left(\frac{r_2 - r_o}{2} \right) \sqrt{r_{кр}^2 + \frac{h_6^2}{2\pi^2}} + \sqrt{r_{кр}^2 - \left(\frac{r_2 - r_o}{2} \right)^2} \right)}{\left(\left(-\frac{r_2 - r_o}{2} \right) \sqrt{r_{кр}^2 + \frac{h_6^2}{2\pi^2}} + \sqrt{r_{кр}^2 - \left(\frac{r_2 - r_o}{2} \right)^2} \right)} \right) \right); \quad (18)$$

$$M_{u.o.cв} = \varphi m_{cв} \frac{h_6^2}{2\pi r_{кр} n} \left(\frac{h_6}{2\pi} \left(\frac{\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1}{2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_2} + \ln \left(\frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \right) \right) + \frac{ctg(\delta + \varphi_{TP})}{r_{кр}} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{r_2 - r_o}{2} \sqrt{r_{кр}^2 - \left(\frac{r_2 - r_o}{2} \right)^2} + 2 \left(\frac{r_{кр}^2}{2} + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2 \right) \arcsin \left(\frac{r_2 - r_o}{2r_{кр}} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{h_6}{\pi} r_{кр} \sqrt{1 + \left(\frac{h_6}{2\pi r_{кр}} \right)^2} \arctg \left(\frac{\pi(r_2 - r_o) \sqrt{r_{кр}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2}}{h_6 \sqrt{r_{кр}^2 - \left(\frac{r_2 - r_o}{2} \right)^2}} \right) \right) \right). \quad (19)$$

Получено аналитическое выражение для определения энергоемкости разрушения породы забоя:

$$H_w = \frac{R_{u.o.cв} + R_{u.o.бок}}{\frac{h_6^2}{2n^2} \left(\frac{\sin \beta_2 - \sin \beta_1}{\pi \sin \beta_1 \sin \beta_2} + \frac{k_{бок}^2}{n} ctg \gamma (\cos^2 \beta_1 + \cos^2 \beta_2) \right)}. \quad (20)$$

где $k_{бок}$ – коэффициент глубины расширяющей части прорези; γ – угол наклона расширяющей части прорези к горизонту, град.

В процессе решения второй задачи определены: силы резания при различных формах режущей кромки ножа; усилия резания ножевым ИО геолода; энергоемкость разрушения породы забоя ножевым ИО геолода.

Таким образом, решена задача «Усовершенствовать математическую модель взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя».

В четвертой главе проведены исследования влияния количества лучей (Рисунок 8), угла наклона ножа к плоскости, перпендикулярной оси вращения (Рисунок 9) и ра-

диуса кривизны режущей кромки ножа (Рисунок 10) на силовые и энергетические параметры взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя с помощью усовершенствованной математической модели взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя.

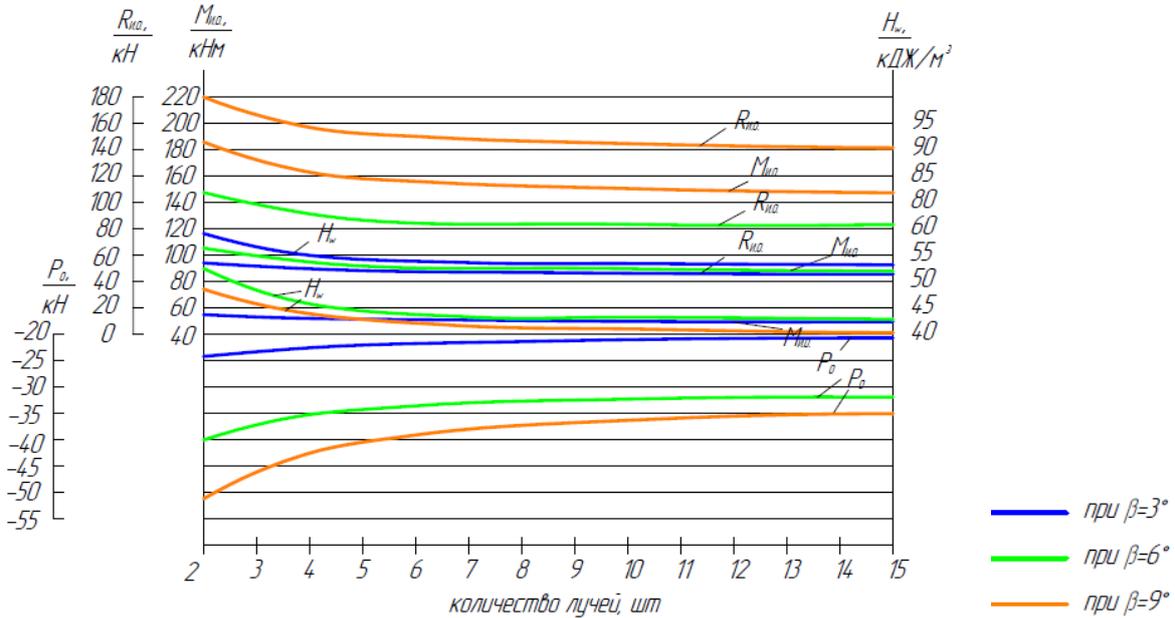


Рисунок 8 – Зависимость силовых и энергетических параметров взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя от количества лучей

Анализ зависимостей на Рисунке 8 показывает, что увеличение количества лучей ведет к уменьшению силовых и энергетических параметров. В диапазоне от 2 до 8 лучей при $\beta=3^\circ$ происходит уменьшение силовых и энергетических параметров до 8%; при $\beta=6^\circ$ до 16% и при $\beta=9^\circ$ до 20%. Увеличение количества лучей больше 8 шт. не значительно влияет на силовые и энергетические параметры взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя.

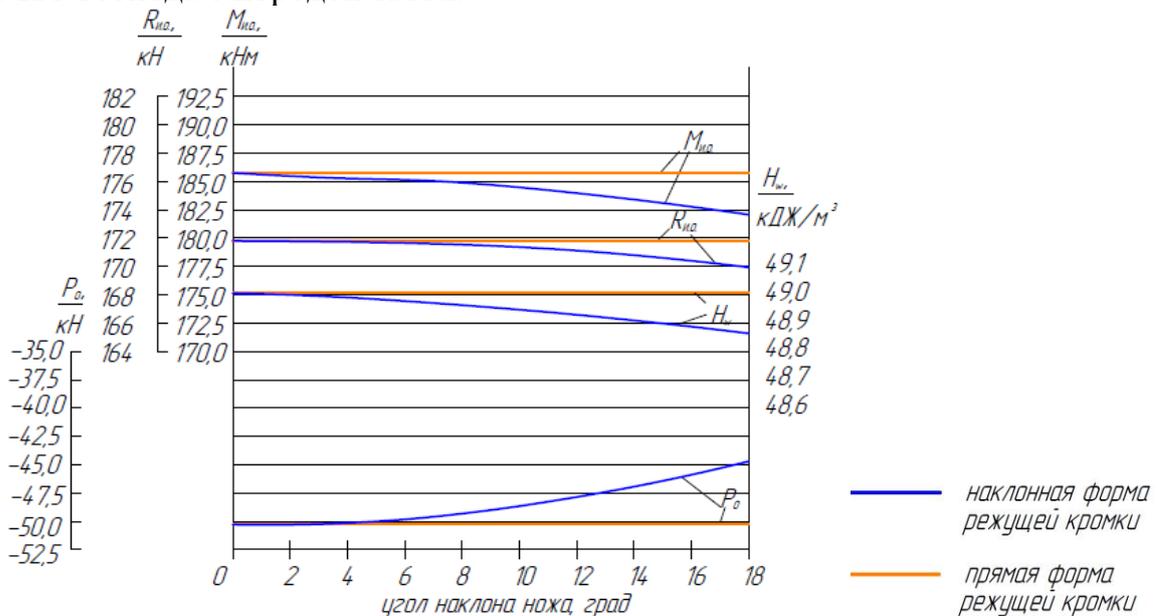


Рисунок 9 – Зависимость силовых и энергетических параметров взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя от угла наклона ножа к плоскости, перпендикулярной оси вращения

При анализе зависимостей, изображенных на рисунке 9, установлено, что при увеличении угла наклона ножа к плоскости, перпендикулярной оси вращения силовые и энергетические параметры уменьшаются не значительно.

Таким образом, угол наклона ножа к плоскости, перпендикулярной оси вращения не оказывает влияние на силовые и энергетические параметры взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя.

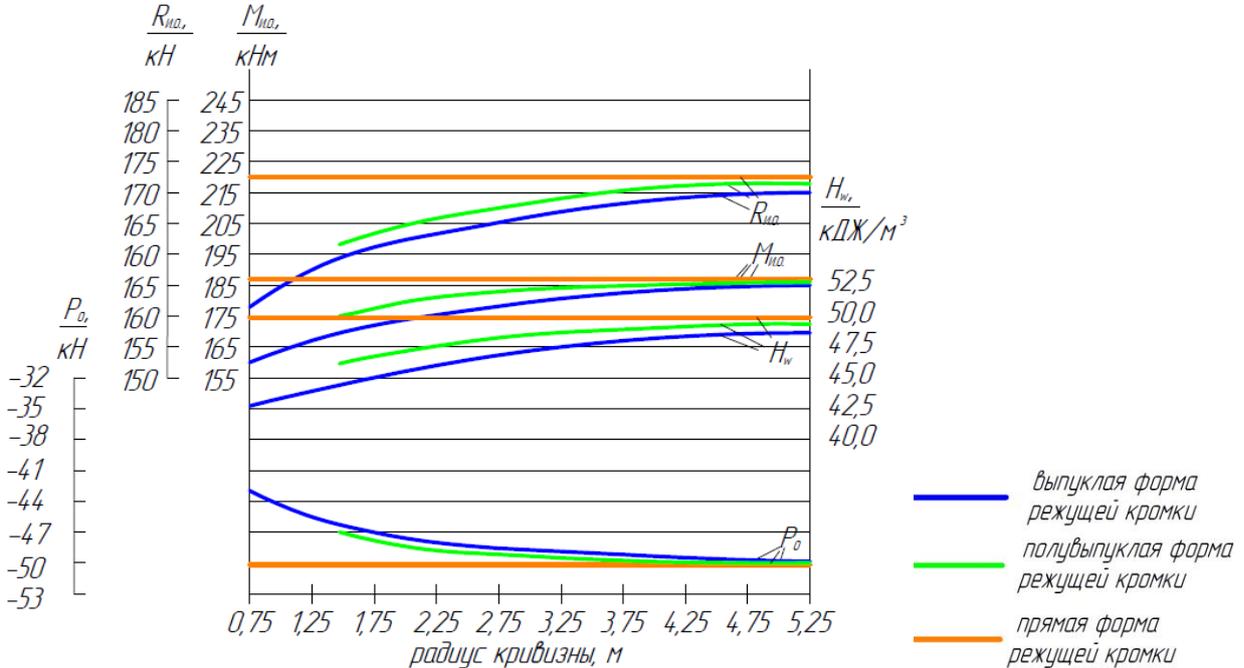


Рисунок 10 – Зависимость силовых и энергетических параметров взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя от радиуса кривизны режущей кромки ножа

В результате анализа зависимости (Рисунок 10) установлено, что:

- увеличение радиуса кривизны приводит к увеличению силовых и энергетических параметров взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя;
- силовые и энергетические параметры при разрушении породы забоя ножевым ИО геолода с полувыпуклой формой режущей кромки ножа при условии равенства радиуса кривизны режущей кромки ножа радиусу геолода принимают на 6% меньшие значения по сравнению с прямой формой режущей кромки ножа.
- силовые и энергетические параметры при разрушении породы забоя ножевым ИО геолода с выпуклой формой режущей кромки ножа при условии равенства радиуса кривизны режущей кромки ножа половине радиуса геолода принимают на 13% меньшие значения по сравнению с прямой формой режущей кромки ножа.

Таким образом, определено влияние количества лучей, угла наклона ножа к плоскости, перпендикулярной оси вращения и радиуса кривизны режущей кромки ножа на силовые и энергетические параметры взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя. Тем самым, решена третья поставленная задача – «Определить влияние конструктивных решений ИО геолода на силовые и энергетические параметры взаимодействия его с породой забоя».

В пятой главе разработана методика определения силовых и энергетических параметров ножевого ИО геолода на основании усовершенствованной математической модели взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя.

На основании результатов проведенных в диссертационной работе исследований, в рамках реализации проекта «Разработка проходческого подземного аппарата класса

«Геоход» (руководитель проекта – Аксенов В.В.), выполняемый в ООО "Сибирское НПО", разработан комплект конструкторской документации и изготовлен ИО демонстрационного образца геохода (Рисунок 11).



Рисунок 11 – Исполнительный орган демонстрационного образца геохода

Силовые и энергетические параметры взаимодействия ножевого ИО демонстрационного образца геохода с породой забоя представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Требуемые силовые и энергетические параметры ИО демонстрационного образца геохода

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Полная проекция силы сопротивления резанию на ось вращения геохода	P_o	Н	-149,2
Полная проекция силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения	$R_{и.о.}$	Н	502
Полный момент сопротивления резанию	$M_{и.о.}$	Н·м	94,4
Энергоемкость разрушения породы забоя ножевым ИО геохода	H_w	кДж/м ³	20

Испытания образца геохода продемонстрировали движение подземного аппарата в геосреде с использованием геосреды. Максимальное перемещение за один проход геохода составило 1204 мм.

Таким образом, решена задача – «Разработать ножевой исполнительный орган демонстрационного образца геохода».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований, изложены новые научно обоснованные технические решения ножевых ИО геохода для разрушения мягких пород, которые вносят вклад в создание новой геотехники и имеющие существенное значение для развития Российской Федерации.

В диссертации решены взаимосвязанные задачи.

1) Результатом решения задачи – «Разработать схемные решения ИО геохода для разрушения мягких пород» является:

– Установлены особенности работы ИО геохода с изгибающимся корпусом на основе которых сформированы дополнительные специальные требования к ИО геохода, основными из которых являются: ИО геохода должен формировать форму забоя обеспечивающую возможность изгибания корпуса; работа ИО геохода должна обеспечивать разрушение забоя в заданном направлении.

– Разработаны схемные и конструктивные решения ножевого ИО геохода для разрушения мягких пород и их классификация.

– Установлено, что наиболее полно предъявляемым требованиям отвечают ножевые ИО геохода: с наклонной формой режущей кромки ножа; с полувыпуклой формой режущей кромки ножа; с выпуклой формой режущей кромки ножа.

2) Результатом решения задачи – «Усовершенствовать математическую модель взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя» является:

– Получены аналитические системы выражений для определения усилий резания при различных формах режущей кромки ножа, учитывающие геометрические параметры ножевого ИО и параметры геосреды.

– Получено аналитическое выражение для определения энергоемкости разрушения породы забоя, учитывающее геометрические параметры ножевого ИО и параметры геосреды.

– Усовершенствована математическая модель взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя, которая включает системы полученных в работе аналитических выражений для определения усилий резания и энергоемкости разрушения породы забоя.

3) В результате решения задачи – «Определить влияние конструктивных решений ИО геохода на силовые и энергетические параметры взаимодействия его с породой забоя» установлено, что:

– Увеличение количества лучей ведет к уменьшению силовых и энергетических параметров ИО. В интервале от 2 до 8 шт. при $\beta=3^\circ$ силовые и энергетические параметры ИО уменьшаются до 8%; при $\beta=6^\circ$ до 16%; при $\beta=9^\circ$ до 20%. Увеличение количества лучей больше 8 шт. не значительно влияет на силовые и энергетические параметры ИО.

– Угол наклона ножа к плоскости, перпендикулярной оси вращения не значительно оказывает влияние на силовые и энергетические параметры ИО.

– С увеличением радиуса кривизны силовые и энергетические параметры ИО увеличиваются. При полувыпуклой форме режущей кромки ножа и $r_{кр} = r_2$, силовые и энергетические параметры ИО на 6 % меньше, чем при прямой форме. При выпуклой форме режущей кромки ножа и $r_{кр} = \frac{r_2 - r_0}{2}$ силовые и энергетические параметры ИО на

13% меньше, чем при прямой форме.

4) Результатом решения задачи – «Разработать ножевой исполнительный орган демонстрационного образца геохода» является:

– Разработана инженерная методика определения требуемых силовых и энергетических параметров ножевого ИО демонстрационного образца геохода.

– Определены параметры ДО геохода: $P_o = -149,2$ Н, $R_{и.о} = 502$ Н, $M_{и.о} = 94,4$ Н·м и $H_w = 20$ кДж/м³. Разработан комплект конструкторской документации и изготовлен демонстрационный проходческий подземный аппарат класса «Геоход» диаметром 0,64 м.

– Проведены испытания ДО геохода, в ходе которых продемонстрировано движение подземного аппарата в геосреде с использованием геосреды. За четыре цикла движения, полностью охваченным геосредой, ДО геохода прошел расстояние 3448 мм, совершив 66,7 оборота.

Дальнейшие исследования планируется вести в следующих направлениях:

1) Разработка моделей взаимодействия ИО геохода с породой забоя при разрушении более крепких пород.

2) Определение дополнительных сопротивлений при резании от:

– сил трения о породы забоя;

– призмы волочения на ИО геохода;

– износа режущей кромки ножа.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих научных трудах:

Статьи в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Аксенов, В.В. Обоснование необходимости создания исполнительного органа геохода для разрушения пород малой крепости / В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, Д.А. Пашков // Вестник КузГТУ. – 2016– № 6(118). – С. 8-15.

2. Аксенов, В.В. Определение силовых параметров ножевого исполнительного органа геохода для разрушения пород малой крепости / В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, Д.А. Пашков // Вестник КузГТУ. – 2017– № 3(121). – С. 116-126.

3. Аксенов, В.В. Совершенствование математической модели определения силовых параметров ножевого исполнительного органа геохода / В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, Е.В. Прейс, Д.А. Пашков // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 5(139). – С. 16–22.

4. Аксенов, В.В. Разработка методики определения энергоемкости разрушения горной породы ножевым исполнительным органом геохода / В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, Д.А. Пашков // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 2(142). – С. 30–38.

5. Аксенов, В.В. Влияние формы режущей кромки на силу резания ножевым исполнительным органом / В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, Д.А. Пашков, А.Ю. Захаров // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 1(147). – С. 30–36.

Статьи в прочих изданиях:

6. Aksenov V. Impact of the number of blades of the geokhod cutting body on cutting forces / V. Aksenov, V. Sadovets, E. Rezanova, D. Pashkov // E3S Web of Conferences. 2017. С. 03015.

7. Aksenov V.V. Impact of the inclination angle of a blade of the geokhod cutting body on the energy intensity of rock destruction / V.V. Aksenov, A.B. Efremenkov, V.Yu. Sadovets, **D.A. Pashkov**, V.A. Efremenkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The conference proceedings ISPCIET 2019. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University". 2019. C. 012003.

8. Aksenov V.V. Impact of the number of blades of the geokhod cutting body on the energy intensity of the rock destruction / V.V. Aksenov, A.B. Efremenkov, V.Yu. Sadovets, **D.A. Pashkov**, V.A. Efremenkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The conference proceedings ISPCIET 2019. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University". 2019. C. 012002.

9. Nesterov V. Determination of the energy capacity of face rock breaking by the geokhods knife operating element and its dependence on the external propellers pitch / V. Nesterov, V. Aksenov, V. Sadovets, **D. Pashkov**, Zh. Beysebayeva // E3S Web of Conferences. IVth International Innovative Mining Symposium. 2019. C. 03024.

10. Nesterov V. Solution for the location of rock cutting elements relative to the rotation center of geokhod / V. Nesterov, V. Aksenov, V. Sadovets, **D. Pashkov**, // E3S Web of Conferences. IVth International Innovative Mining Symposium. 2019. C. 03001.

11. Aksenov V. Analysis of compliance with the requirements for geokhod actuating device circuit design for soft rocks destruction / V. Aksenov, V. Nesterov, V. Sadovets, **D. Pashkov** // E3S Web of Conferences. T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. 2020. C. 03011.

12. Aksenov V.V. Classifications of schematic solutions of the geokhod knife operating body and the interaction surface of the geokhod operating body with bottom rock / V.V. Aksenov, A.B. Efremenkov, V.Yu. Sadovets, **D.A. Pashkov**, V.A. Efremenkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The conference proceedings ISPCIET 2020. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University". 2020. C. 012002.

13. Aksenov V.V. Determining the interaction surface parameters of the geokhod knife operating body with the face rock / V.V. Aksenov, A.B. Efremenkov, V.Yu. Sadovets, **D.A. Pashkov**, V.A. Efremenkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The conference proceedings ISPCIET 2020. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University". 2020. C. 012002.

14. Aksenov V.V. Influence of the knife shape on the operating body cutting force / V.V. Aksenov, A.B. Efremenkov, V.Yu. Sadovets, **D.A. Pashkov**, V.A. Efremenkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The conference proceedings ISPCIET 2020. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University". 2020. C. 012002.

15. Садовец В.Ю. Физико-механические свойства горных пород малой крепости / В.Ю. Садовец, В.Ю. Бегляков, **Д.А. Пашков** // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. — Прокопьевск: изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2016. — С. 142–147.

16. Аксенов В.В. Определение проекции составляющей силы резания на ось вращения геохода / В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, **Д.А. Пашков** // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции. — Прокопьевск: изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2018. — С. 363–368.

17. Аксенов В.В. Определение проекции составляющей силы резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода / В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, **Д.А. Пашков** // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции. — Прокопьевск: изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2018. — С. 368–374.

18. **Пашков Д.А.** Анализ методики определения энергоёмкости разрушения породы / **Д.А. Пашков** // XI Всероссийская, 64 науч.-практическая конф. молодых учёных с международным участием «Россия молодая». — Кемерово: КузГТУ, 2019 - С. 10308.

19. **Пашков Д.А.** Влияние шага внешнего движителя на энергоёмкость разрушения породы забоя ножевым исполнительным органом геохода / **Д.А. Пашков** // XI Всероссийская, 64 науч.-практическая конф. молодых учёных с международным участием «Россия молодая». — Кемерово: КузГТУ, 2019 - С. 10309.

20. **Пашков Д.А.** Обзор методик определения энергоёмкости разрушения породы / **Д.А. Пашков** // XI Всероссийская, 64 науч.-практическая конф. молодых учёных с международным участием «Россия молодая». — Кемерово: КузГТУ, 2019 - С. 10310.

21. Аксенов В.В. Определение сил резания ножевым исполнительным органом с наклонной режущей кромкой / В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, **Д.А. Пашков** // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. — Прокопьевск: изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2020. — С. 98–104.

22. Аксенов В.В. Определение сил резания ножевым исполнительным органом со сферической режущей кромкой / В.В. Аксенов, В.Ю. Садовец, Е.В. Прейс, **Д.А. Пашков** // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. — Прокопьевск: изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, 2020. — С. 104–110.

23. Садовец В.Ю. Разработка схемных решений исполнительного органа геохода для разрушения мягких пород / В.Ю. Садовец, **Д.А. Пашков** // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы IX международной научно-практической конференции. — Междуреченск: изд-во КузГТУ, 2020. — С. 139.

24. Садовец В.Ю. Разработка схемных решений поверхности взаимодействия ножевого исполнительного органа геохода с породой забоя / В.Ю. Садовец, **Д.А. Пашков** // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы IX международной научно-практической конференции. — Междуреченск: изд-во КузГТУ, 2020. — С. 140.

25. **Пашков Д.А.** Классификация схемных решений поверхности взаимодействия исполнительного органа геохода с породой забоя / **Д.А. Пашков** // XII Всероссийская, 65 науч.-практическая конф. молодых учёных с международным участием «Россия молодая». — Кемерово: КузГТУ, 2020 - С. 10309.1-10309.7.

26. **Пашков Д.А.** Классификация схемных решений исполнительного органа геолога для разрушения мягких пород / **Д.А. Пашков** // XII Всероссийская, 65 науч.-практическая конф. молодых учёных с международным участием «Россия молодая». — Кемерово: КузГТУ, 2020 - С. 10308.1-10308.7.

Патент:

27. Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., **Пашков Д.А.** Способ строительства подземной выработки и щитовой проходческий агрегат для его осуществления // патент на изобретение RUS 2703027 С1, 15.10.2019.

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

[1], [15] – постановка задачи, проведение аналитического обзора;

[2-4], [16], [17], [21], [22] – усовершенствование математической модели взаимодействия ножевого ИО геолога с породой забоя;

[5-14], [23], [24] – выполнение основного объема исследований, обработка полученных результатов, формулировка выводов.

[27] – разработка идеи технического решения и формулировка его сущности.

Подписано к печати 29. апреля. 2021 г. Формат 64x84/16
Уч.-изд. л. 1.0 Тираж 100 экз. Заказ №196
Отпечатано в издательском центре УИП КузГТУ.
650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.