

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр угля и углехимии
Сибирского отделения Российской академии наук»

На правах рукописи

Пашков Дмитрий Алексеевич

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

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Аксенов Владимир Валерьевич

Кемерово – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ..	10
1.1 Формирование подземного пространства	10
1.2 Общие сведения о геоходах	11
1.2.1 Особенности работы исполнительного органа геохода	13
1.2.2 Поверхность взаимодействия исполнительного органа геохода с породой забоя	16
1.3 Исполнительные органы для разрушения мягких пород	19
1.4 Требования к исполнительным органам геохода	21
1.5 Метод многокритериального анализа TOPSIS	23
1.6 Методики определения сил резания ножевыми исполнительными органами	26
1.7 Методики определения энергоемкости разрушения горных пород	31
1.8 Выводы	33
2 РАЗРАБОТКА СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГЕОХОДА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ МЯГКИХ ПОРОД	35
2.1 Особенности работы исполнительного органа геохода с изгибающимся корпусом	35
2.2 Формирование дополнительных специальных требований к исполнительному органу геохода с изгибающимся корпусом	36
2.3 Разработка схемных решений исполнительного органа геохода для разрушения мягких пород	37
2.4 Анализ схемных решений исполнительного органа геохода для разрушения мягких пород на соответствие предъявляемым к ним требованиям	43
2.5 Выводы	48

3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НОЖЕВОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГЕОХОДА С ПОРОДОЙ ЗАБОЯ	49
3.1 Формирование исходных данных	49
3.2 Определение сил резания при различных формах режущей кромки ножа	53
3.3 Определение суммарных усилий резания ножевым исполнительным органом геохода	62
3.3.1 Установление зависимости усилия резания от ширины среза на ножевом исполнительном органе геохода с прямой формой режущей кромки ножа	64
3.3.2 Установление зависимости усилия резания от ширины среза на ножевом исполнительном органе геохода с наклонной формой режущей кромки ножа	68
3.3.3 Установление зависимости усилия резания от ширины среза на ножевом исполнительном органе геохода с полувыпуклой формой режущей кромки ножа	71
3.3.4 Установление зависимости усилия резания от ширины среза на ножевом исполнительном органе геохода с выпуклой формой режущей кромки ножа	76
3.4 Определение энергоемкости разрушения породы забоя ножевым исполнительным органом геохода	82
3.5 Выводы	85
4 ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГЕОХОДА НА СИЛОВЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЕГО С ПОРОДОЙ ЗАБОЯ	89
4.1 Параметры геосреды для условий резания острыми ножами	89
4.2 Влияние геометрических параметров конструктивных решений исполнительного органа геохода на его силовые параметры	90
4.2.1 Влияние радиуса геохода на силовые параметры конструктивных решений исполнительного органа геохода	91

4.2.2	Влияние радиуса образующей на силовые параметры конструктивных решений исполнительного органа геолода	94
4.2.3	Влияние шага внешнего движителя на силовые параметры конструктивных решений исполнительного органа геолода	97
4.2.4	Влияние количества лучей на силовые параметры конструктивных решений исполнительного органа геолода	99
4.2.5	Влияние угла наклона ножа на силовые параметры конструктивных решений исполнительного органа геолода	103
4.2.6	Влияние радиуса кривизны режущей кромки ножа на силовые параметры конструктивных решений исполнительного органа геолода	105
4.3	Влияние геометрических параметров конструктивных решений исполнительного органа геолода на энергоемкость разрушения породы забоя	110
4.4	Выводы	115
5	РАЗРАБОТКА НОЖЕВОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО ОБРАЗЦА ГЕОЛОДА	118
5.1	Разработка инженерной методики определения силовых и энергетических параметров ножевого исполнительного органа геолода.....	118
5.2	Формирование исходных данных	121
5.3	Расчет требуемых силовых и энергетических параметров ножевого исполнительного органа демонстрационного образца геолода	143
5.4	Изготовление и испытания демонстрационного образца геолода	148
5.5	Выводы	158
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	160
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	163
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	176

ВВЕДЕНИЕ

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 геоходной технологии, в основе которой используется геосреда для создания напорных усилий и силы тяги у проходческого агрегата. Базовым элементом технологии является геоход, 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. Протодяконова.

При разработке ИО геохода 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 геохода для разрушения мягких пород, является актуальной.

Степень разработанности.

Исследованием ИО геохода 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 геохода с прямой формой режущей кромки ножа, определен ряд кинематических и силовых параметров барабанного исполнительного органа, обоснованы

параметры законтурных исполнительных органов геогодов для разрушения пород средней крепости, обоснована рациональная форма поверхности взаимодействия ИО геогода 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 геогода для разрушения мягких пород;
- влияние параметров ножевых ИО геогода на энергоемкость разрушения породы забоя ИО геогода.

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

Идея работы – для оценки, определения и расчета силовых и энергетических параметров исполнительных органов геогода 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 геогода для разрушения мягких пород.
- 2) Усовершенствование математической модели взаимодействия ножевого ИО геогода с породой забоя.
- 3) Определение влияния конструктивных решений ИО геогода на силовые и энергетические параметры взаимодействия его с породой забоя.
- 4) Разработка ножевого исполнительного органа демонстрационного образца геогода.

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 получении 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.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Формирование подземного пространства

Рост, как населения, так и численности транспортных средств связан с развитием цивилизации. Развитие цивилизации приводит к интенсивному освоению неосвоенных территорий, находящихся на поверхности планеты, и нахождению новых мест [1-3].

Для решения проблем, связанных с развитием цивилизации, существуют приоритетные направления. К которым относится строительство подземных сооружений различного назначения [4, 5]. В развитых странах такое строительство увеличивается в два раза каждые 10 лет [4-8]. В дальнейшем следует ожидать увеличения темпов строительства подземных сооружений.

В работах [1, 2, 4, 5] для решения проблем современного общества отмечается освоение подземного пространства на глубине 20-50 м.

В условиях Кузбасса на данной глубине, в основном, встречаются такие породы, как слабые песчаники, суглинки. Глубина залегания их колеблется от дневной поверхности до 95 м [9]. Для данных пород характерен коэффициент крепости до $f = 1$ по шкале профессора М.М. Протодяконова [10]. Степень крепости – мягкие породы.

Таким образом, строительство подземных сооружений различного назначения имеет тенденцию к значительному росту во всем мире. Подземные объекты, как правило, строятся на небольших глубинах, которым характерны породы с коэффициентом крепости до $f = 1$ ед. по шкале М.М. Протодяконова. При этом одной из перспективных технологий для проходки подземных выработок, решающей современные проблемы общества, является геовинчестерная (геоходная) технология (ГВТ) [11].

1.2 Общие сведения о геоходах

Геоходами называют проходческие подземные аппараты, отличительной особенностью которых является движение в геосреде за счет использования приконтурного массива горных пород [3, 7, 8, 12-17]. Подача на забой реализуется взаимодействием внешнего движителя и элементов противовращения с системой законтурных каналов (Рисунок 1.1). То есть, проходка подземных выработок рассматривается, как процесс движения подземного аппарата (твердого тела) в геосреде [3, 7, 8, 12-17].

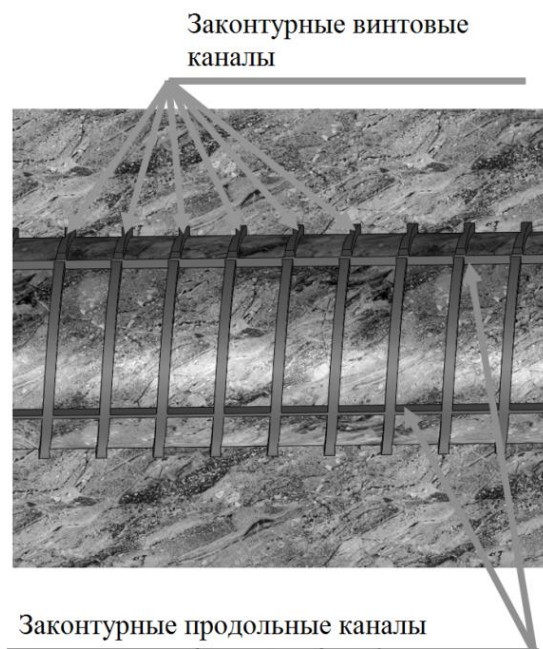


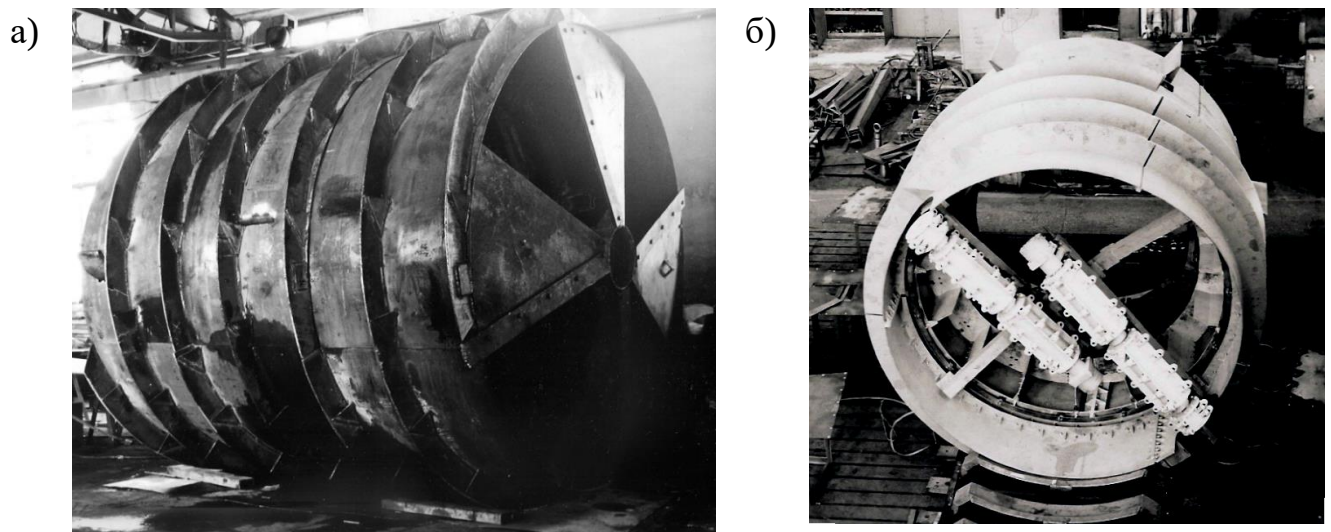
Рисунок 1.1 – Система законтурных каналов

Развитие геоходов началось в середине 80-х годов прошлого столетия [18, 19]. В тот период формирования геоходной технологии проходческий подземный аппарат назывался винтоповоротным проходческим агрегатом (ВПА).

Разработкой ВПА «ЭЛАНГ» занимались А.Ф. Эллер, В.В. Аксенов, В.Д. Нагорный, В.Ф. Горбунов, Н.Б. Пушкина и др. Тогда же были разработаны два образца ВПА:

- «ЭЛАНГ-3» (Рисунок 1.2, а). Прошел шахтные испытания.
- «ЭЛАНГ-4» (Рисунок 1.2, б). Прошел стендовые испытания.

Испытания ВПА доказали функционирование их систем, что и послужило началом создания геохода [20-22].



а) «ЭЛАНГ-3»; б) «ЭЛАНГ-4»

Рисунок 1.2 – Образцы ВПА

Разработка ВПА в начале 90-х годов была приостановлена по социально-экономическим причинам.

Сегодня интерес к геоходам наблюдается со стороны ученых и со стороны государства. В области разработки геовинчестерной технологии создан научно-практический задел [23-26]. Подтверждена патентная чистота ВПА [27-37] и геохода [23, 38-42].

Сотрудниками ЮТИ ТПУ, ООО «Юргинский машзавод», КузГТУ, ОАО «КОРМЗ» выполнен комплексный проект: «Создание и постановка на производство нового вида щитовых проходческих агрегатов многоцелевого назначения – геоходов». Проект является победителем конкурса Министерства образования и науки (2013-218-04) по отбору организаций на право получения субсидий на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства [24, 25].

В ходе работ по комплексному проекту коллективом выполнен комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Создан опытный образец геохода модели «401», изображенный на рисунке 1.3[26].



Рисунок 1.3 – Опытный образец геохода модели «401» диаметром 3,2 м

В настоящее время развитием геоходов занимаются: В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, А.Б. Ефременков, В.Ю. Бегляков, В.Ю. Садовец, А.В. Коперчук, М.Ю. Блащук, А.А. Дронов и др.

1.2.1 Особенности работы исполнительного органа геохода

Взаимодействия внешнего движителя с геосредой и характер движения проходческого аппарата определяются в значительной степени особенностью работы ИО геохода [43-46]. Характер подачи режущего инструмента ИО геохода на забой определяется работой внешнего движителя и его геометрических параметров. Исключение веса геохода из процесса формирования напорного усилия обеспечивается характером взаимодействия внешнего движителя с системой контурных каналов. Исключение веса ведет к снижению металлоемкости проходческого агрегата [47-49].

Взаимодействие геохода с геосредой обеспечивает возможность создания больших напорных усилий на ИО геохода.

Перемещение геохода на забой имеет своеобразный характер. Обусловлен он формированием поверхности взаимодействия ИО геохода с породой забоя (ПВ) и ИО сложной формы. ПВ принимает вид нескольких винтовых поверхностей с уступами [44, 47]. Пример представлен на рисунке 1.4.

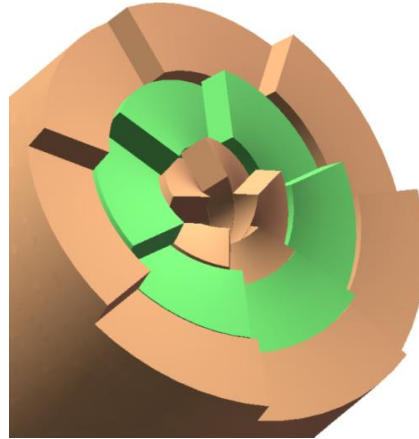


Рисунок 1.4 – Поверхность взаимодействия ИО геохода с породой забоя

Например, точка A ножевого ИО геохода (Рисунок 1.5), находящаяся на периферии ножа, при шаге внешнего движителя $h_в$, за один полный оборот по окружности, переместится на забой под углом β_1 к плоскости перпендикулярной оси вращения геохода [16, 50, 51]:

$$\beta_1 = \arctg \frac{h_в}{2\pi r_г}, \quad (1.1)$$

где $r_г$ – радиус геохода.

Каждая точка ножа, находящаяся на расстоянии x (Рисунок 1.5) от оси вращения геохода, переместится на забой под углом [13, 18, 50, 51]:

$$\beta_x = \arctg \frac{h_в}{2\pi x}. \quad (1.2)$$

При движении ножевого ИО геохода на забой, точки ножа сформируют геликоидную поверхность.

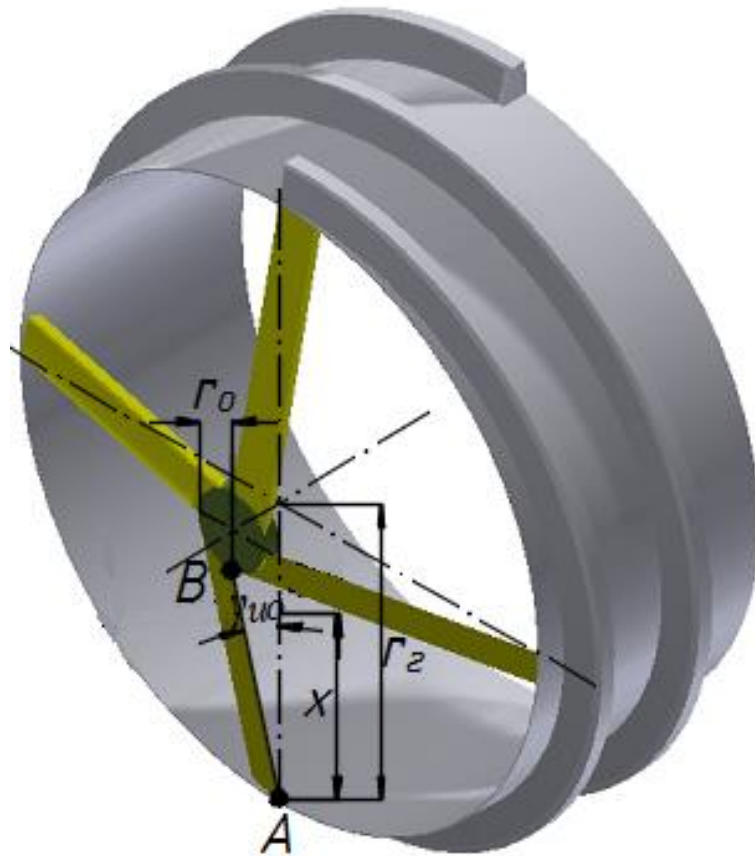


Рисунок 1.5 – Схема ножевого исполнительного органа

Из рисунка 1.6, на срезаемый слой любой точкой ножа влияет угол перемещения ее на забой.

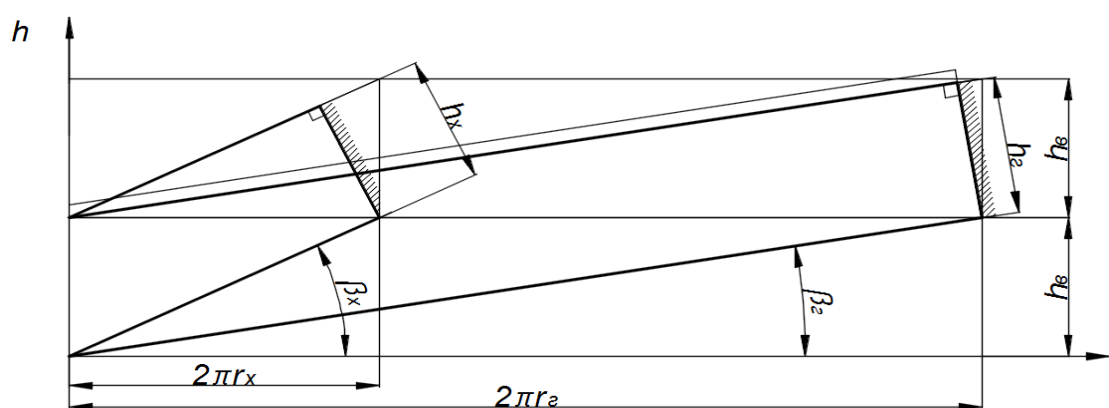


Рисунок 1.6 – Развертка цилиндрического сечения поверхности забоя ИО геолода для разрушения мягких пород с породой забоя

Таким образом, на высоту формируемого уступа h влияют шаг внешнего движителя, количество лучей на ИО и угол перемещения точки ножа ИО геохода на забой [44, 47]:

$$h = \frac{h_g}{n} \cos \beta_x, \quad (1.3)$$

где n – количество лучей на ИО.

Характеру работы ИО геохода присущ ряд особенностей, отличающий от характера работы других подземных агрегатов, а именно:

- Не имеет аналогов среди существующих горнопроходческих систем.
- Размещение рабочих механизмов в условиях ограниченного пространства на вращающейся несущей конструкции.
- Необходимость разрушения поверхности забоя на полное сечение проводимой выработки и на шаг внешнего движителя за один оборот геохода.
- Перемещение режущих инструментов, находящихся ближе к оси вращения геохода, обеспечивается под большими углами, в отличие от режущих инструментов, находящихся на периферии.
- Необходимость формирования и разрушения уступа.
- Необходимость обеспечения соответствия параметрам внешнего движителя и жесткой кинематической связи с ним.
- Размещение и одновременная согласованная работа большого числа разрушающих инструментов (ножей, шнеков, барабанов, баров и т.п.) [46].

1.2.2 Поверхность взаимодействия исполнительного органа геохода с породой забоя

В работе Беглякова В.Ю.[44] было выявлено, что:

- наличие уступа приводит к смещению значений главных напряжений в породе забоя в сторону растяжения по сравнению с аналогичным воздействием при плоском забое;

- при разрушении уступа происходит снижение энергоёмкости разрушения породы забоя по сравнению с плоским забоем;
- вне зависимости от направления сил резания проявляются преимущества наличия уступа.

Бегляковым В.Ю. была разработана 3D-модель поверхности взаимодействия ИО геолода с породой забоя, представленная на рисунке 1.7 [44, 47, 48, 52].

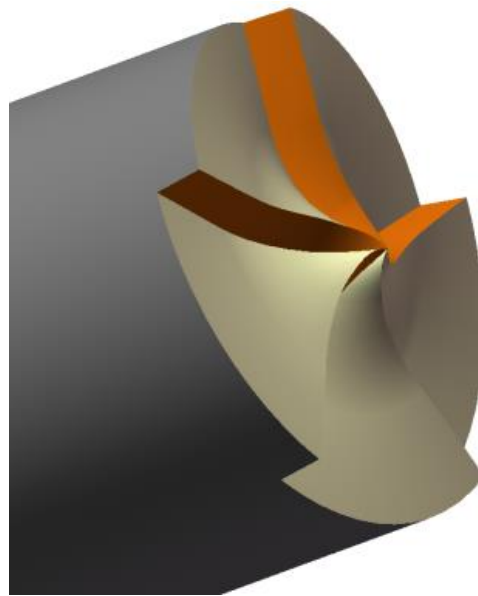


Рисунок 1.7 – 3D-модель поверхности взаимодействия ИО геолода с породой забоя

При моделировании силового взаимодействия ИО геолода с породой забоя из эпюры главных напряжений σ_z (Рисунок 1.8) выявлено, что в центральной части забоя происходит смещение значений главных напряжений в породе забоя в сторону растяжения.

По результатам моделирования автором была получена рациональная форма образующей забоя (Рисунок 1.9) [44, 47, 48, 52].

Расположение режущего инструмента исполнительного органа геолода позволяет управлять смещением главных напряжений в породе забоя. Смещение достигается при неперпендикулярности ПВ оси выработки во время движения геолода [53-55].

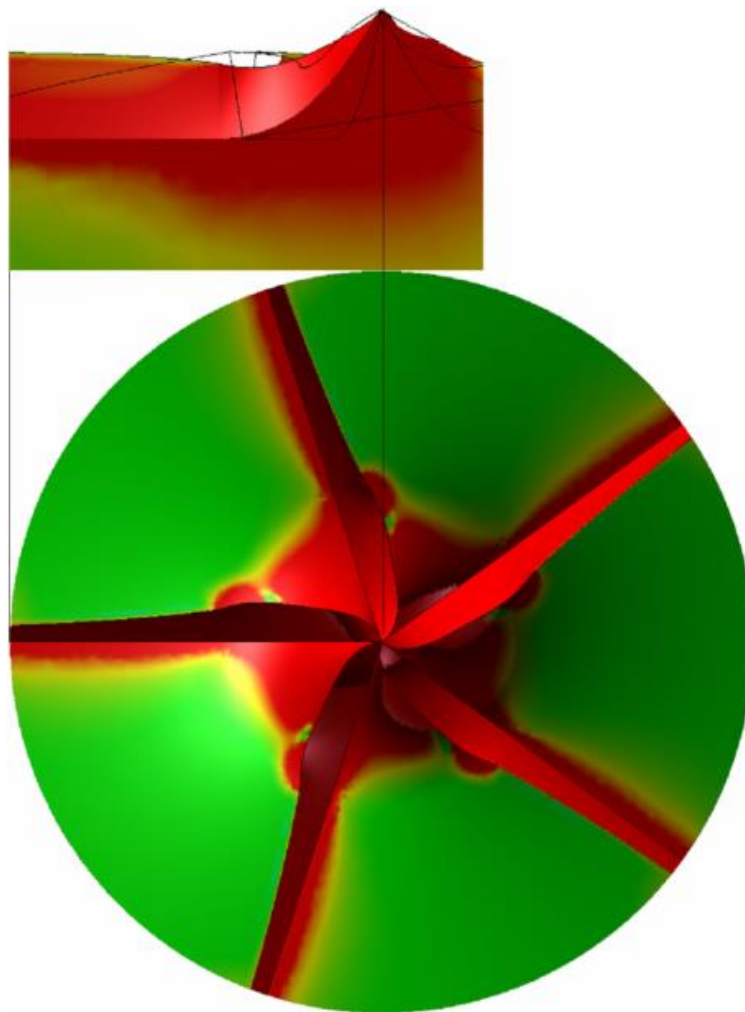


Рисунок 1.8 – Эпюры главных напряжений σ_3

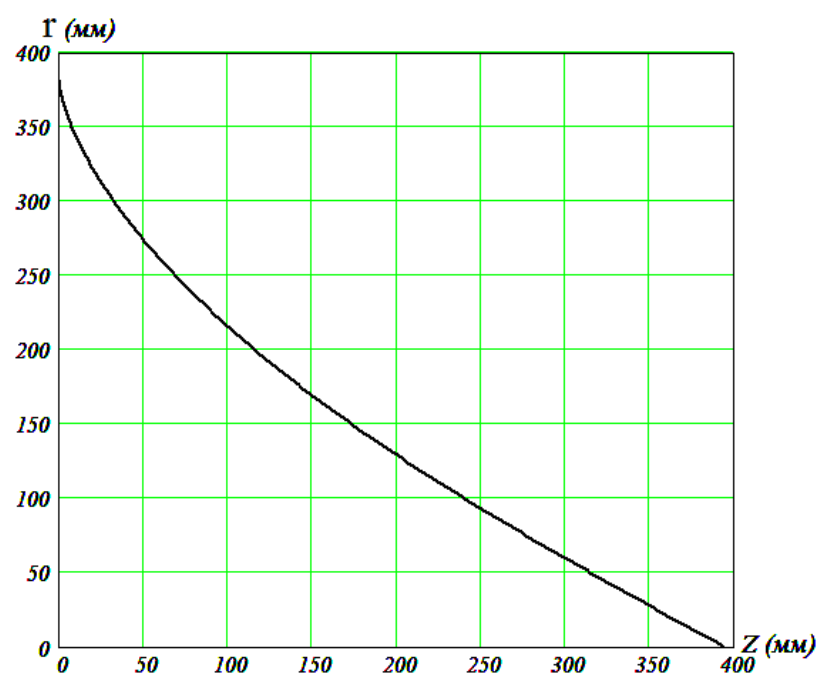


Рисунок 1.9 – Рациональная форма образующей забоя

ПВ с уступом приводит к снижению энергоёмкости разрушения породы забоя по сравнению с плоским забоем.

1.3 Исполнительные органы для разрушения мягких пород

К машинам, для разрушения мягких пород относятся проходческие щиты, землеройные машины, машины для бестраншейной прокладки труб [56].

За разрушение горных пород отвечает исполнительный орган подземного аппарата (горной машины).

Исполнительный орган – устройство, предназначенное для разрушения, для разрушения и погрузки или только для погрузки горной массы транспортабельными кусками [57].

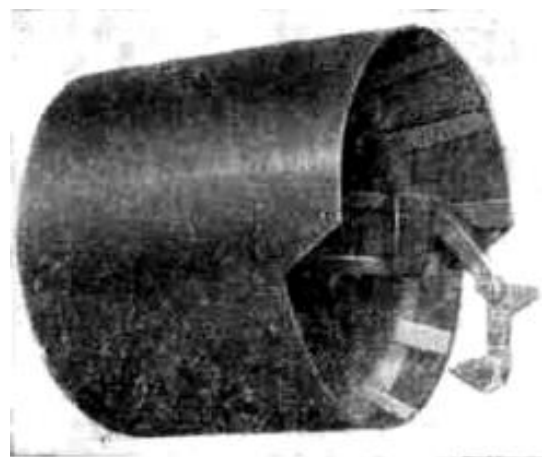
На механизированных проходческих щитах ИО подразделяются по принципу разрушения забоя. Представлены двумя типами: избирательного и бурового.

Разрушающими инструментами при проходке выработок по мягким породам являются резцы и ножи, представленные на рисунке 1.10. [58-61].

а)



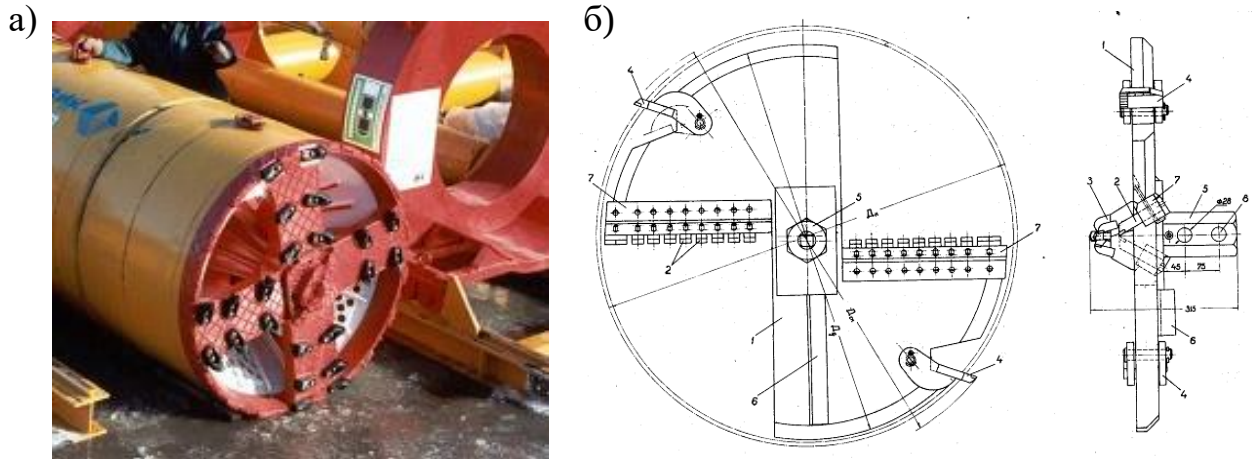
б)



а) резцовые; б) ножевые

Рисунок 1.10 – ИО проходческих щитов для разрушения мягких пород

При необходимости создания полостей на небольшой глубине применяют машины для бестраншейной прокладки труб, которые изображены на рисунке 1.11 [62-65].



а) ИО установки горизонтального бурения типа УГБ;

б) ИО установки для прокладки трубопроводов

Рисунок 1.11 – Исполнительные органы машин для бестраншейной прокладки труб

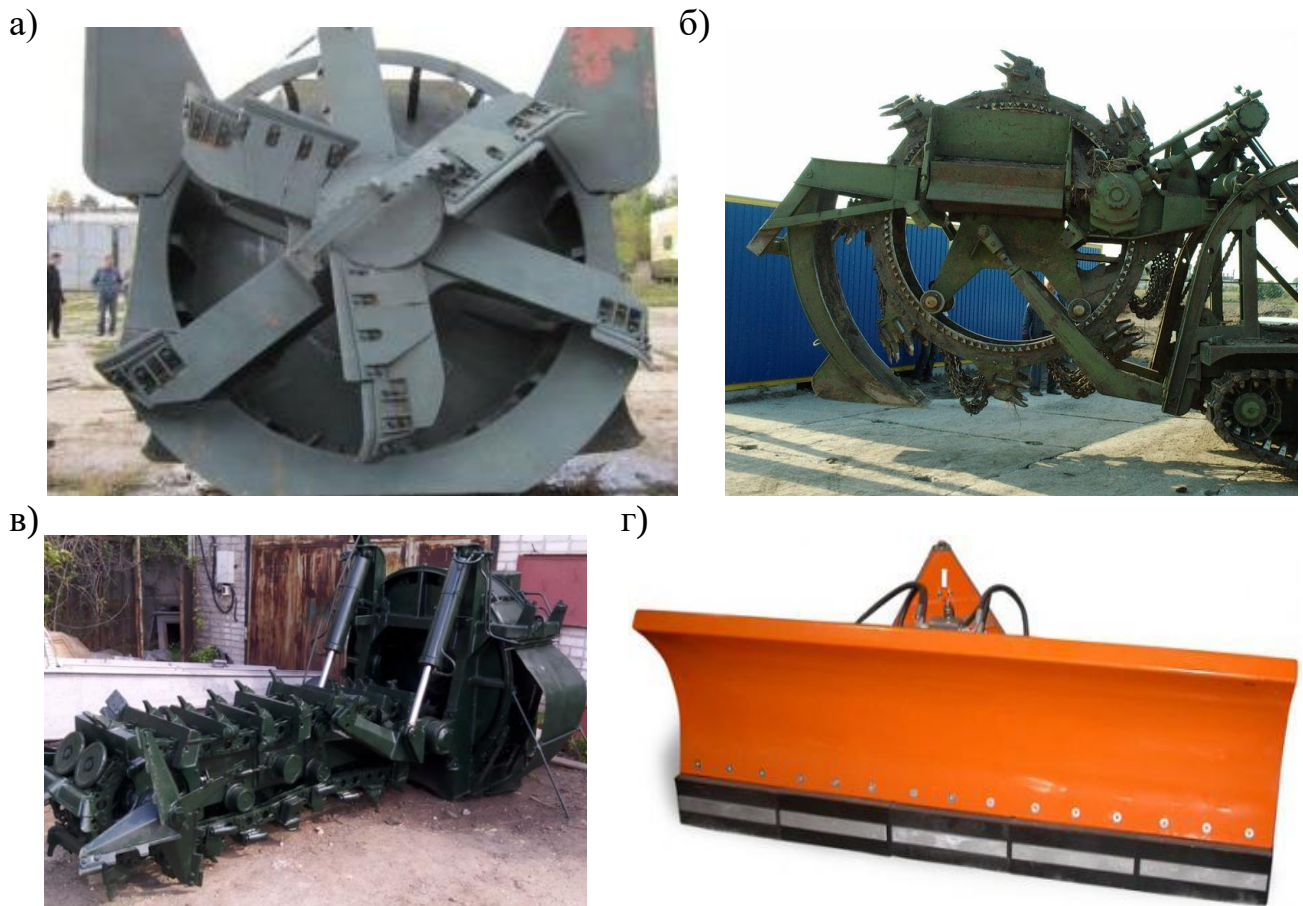
В качестве разрушающих инструментов машин для бестраншейной прокладки труб применяют резцы или ножи.

Проходку выработок по мягким породам проводят не только подземным способом, но и открытым. С поверхности разрабатывают траншеи, котлованы. Для разработки с поверхности используют котлованные машины (Рисунок 1.12). ИО котлованных машин представляют собой роторную фрезу, диск с отбрасывателем, бар, клин (Рисунок 1.12).

Режущие инструменты при проходке выработок по мягким породам представлены ножами и резцами (Рисунок 1.12).

Стоит отметить, что недостаток, представленных выше исполнительных органов, заключается в принципе создания напорного усилия. То есть, для увеличения напорного усилия необходимо увеличивать массово-габаритные характеристики машины [7].

Основными разрушающими инструментами при проходке по мягким породам относятся резцы и ножи.



а) ИО машины МДК-3; б) ИО машины БТМ-3;
в) ИО машины ПЗМ-2; г) ИО автогрейдера ДЗ-122А
Рисунок 1.12 – ИО землеройных машин

1.4 Требования к исполнительным органам геохода

Эффективность использования как горных машин, так и землеройных будет наивысшей только тогда, когда они выполняют наибольшие объемы работ при наименьших затратах.

Поэтому, к горным и землеройным машинам предъявляется ряд общих требований [66, 67]:

- низкая энергоемкость разрушения породы забоя;
- высокая производительность;
- высокая надёжность как отдельных элементов, так и конструкции в целом;

- высокий КПД;
- возможность автоматизации.
- минимальная динамичность рабочих процессов;
- минимальное пылеобразование при работе;

Разработкой специальных требований к системам геохода занимались такие авторы как Аксенов В.В., Ефременков А.Б., Садовец В.Ю., Бегляков В. Ю., Ананьев К.А., Ермаков А.Н. Авторами сформулированы общие требования к системам геохода [68, 69], требования к ИО разрушения главного забоя геохода [44, 70, 71], требования к законтурным ИО [72].

К ИО разрушения главного забоя и к законтурным ИО, требования разрабатывались с учетом условий работы и назначения [70, 71].

К специфическим требованиям предъявляемым к исполнительным органам геохода относятся:

- обеспечение достаточной производительности вне зависимости от пространственного расположения геохода;
- обеспечение достаточной маневренности вне зависимости от пространственного расположения геохода;
- непрерывное перемещение геохода на забой, вне зависимости от свойств горных пород;
- обеспечение монтажа ограждающей оболочки, исключаящей вывалы из груди забоя;
- непосредственный доступ к элементам ИО для ремонта, замены или модификации;
- взаимозаменяемость ИО любых типов;
- работа ИО должна строго соответствовать характеру и параметрам подачи геохода на забой;
- геометрические параметры ИО геохода должны полностью соответствовать параметрам внешнего движителя;
- ИО должен полностью перекрывать забой;
- компактность приводных механизмов ИО.

Полнота удовлетворения предъявляемым требованиям к ИО геохода зависит не только от выбора типа ИО и его параметров, а также от их увязки с параметрами внешнего движителя [69, 70, 71, 72].

1.5 Метод многокритериального анализа TOPSIS

Разработка новых схемных вариантов обязательно приводят к задаче выбора единственного наилучшего варианта либо группы наиболее предпочтительных решений.

Так для принятия решения необходимо объяснения своего выбора. Для этого сравниваются варианты между собой по определенным критериям, которыми могут быть требования, какие-либо числовые значения, связывающие между собой возможные варианты.

Процесс выбора сводится к применению методов многокритериального анализа, в зарубежной литературе известных как MCDA – Multi Criteria Decision Analysis [73, 74].

На сегодня разработано больше 70 различных методов Multi Criteria Decision Analysis [73]. Данные, приведенные в [74], демонстрируют, что для решения задачи выбора наилучшего варианта используются методы: TOPSIS, АНР, ELECTRE, GoalProgramming, ANP, MAUT, DEA, MACBETH.

Выбор единственного наилучшего варианта, либо группы наиболее предпочтительных вариантов обеспечивает метод TOPSIS (The Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution).

Основная идея метода TOPSIS заключается в том, что наиболее предпочтительная альтернатива должна иметь не только наибольшую близость к идеальному решению, но и быть дальше всех остальных альтернатив от неприемлемого решения [75].

Исходными данными для выбора варианта методом TOPSIS является матрица решений (таблица 1.1), включающая в себя оценки альтернатив (n_a) по критериям (k_i), а также веса критериев (w_i).

Таблица 1.1 – Матрица решений

Альтернативы	Критерии			
	k_1	k_2	k_3	k_i
	Вес критерия			
	w_1	w_2	w_3	w_i
n_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{3i}
n_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{2i}
n_a	x_{a1}	x_{a2}	x_{a3}	x_{ai}

Метод TOPSIS состоит из пяти шагов вычислений. Первым шагом является обработка эффективности вариантов по различным требованиям. Эти характеристики должны быть нормализованы на втором этапе. Нормализованные показатели сравниваются с наилучшим результатом. Далее рассчитывается приближенность каждого показателя варианта с идеальным и анти идеальным показателем. И, наконец, определяется относительный коэффициент приближенности для каждого варианта.

1) Нормализация

Нормализация позволяет сравнивать различные меры единиц. В качестве метода нормализации используется метод идеальной нормализации.

Для метода идеальной нормализации требуется деления каждого показателя на наибольший в каждом столбце:

$$r_{ai} = \frac{x_{ai}}{u_{ai}}, \quad (1.4)$$

где $u_{ai} = \max(x_{ai})$ для $a = 1, \dots, n$.

Рассчитанные значения r_{ai} сводятся в таблицу 1.2.

2) Теперь рассчитываются весовые коэффициенты по выражению (1.5) путем умножения r_{ai} на их соответствующие веса w_i .

$$v_{ai} = r_{ai} \cdot w_i. \quad (1.5)$$

Таблица 1.2 – Значения r_{ai} при идеальной нормализации

Альтернативы	Критерии			
	k_1	k_2	k_3	k_i
n_1	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{1i}
n_2	r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{2i}
n_a	r_{a1}	r_{a2}	r_{a3}	r_{ai}

Рассчитанные значения v_{ai} записываются в таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Весовая нормализованная матрица решений

Альтернативы	Критерии			
	k_1	k_2	k_3	k_i
n_1	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{1i}
n_2	v_{21}	v_{22}	v_{23}	v_{2i}
n_a	v_{a1}	v_{a2}	v_{a3}	v_{ai}

3) Весовые коэффициенты будут использоваться для сравнения каждого показателя с наибольшим и наименьшим коэффициентом. Для этого составляется таблица 1.4.

Таблица 1.4 – Значения наибольшего и наименьшего коэффициента

Коэффициенты	Критерии			
	k_1	k_2	k_3	k_i
A^+	v_{a1max}	v_{a2max}	v_{a3max}	v_{aimax}
A^-	v_{a1min}	v_{a2min}	v_{a3min}	v_{aimin}

4) Вычисляется приближенность каждого показателя таблицы 1.4 к наибольшему и наименьшему коэффициенту по выражениям (1.6) и (1.7).

$$d_a^+ = \sqrt{\sum_i (v_i^+ - v_{ai})^2} \quad a = 1, \dots, m, \quad (1.6)$$

$$d_a^- = \sqrt{\sum_i (v_i^- - v_{ai})^2} \quad a = 1, \dots, m. \quad (1.7)$$

Вычисленные данные сводятся в таблицу 1.5.

5) Расчет относительного коэффициента приближенности каждого варианта к наибольшему коэффициенту. Производится по выражению (1.8).

$$C_a = \frac{d_a^-}{d_a^+ + d_a^-}. \quad (1.8)$$

Относительные коэффициенты приближенности записываются в таблицу приближенности показателей (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Приближенность показателей

Коэффициенты	Альтернативы		
	n_1	n_2	n_a
d_a^+	d_1^+	d_2^+	d_a^+
d_a^-	d_1^-	d_2^-	d_a^-
C_a	C_1	C_2	C_a

Далее выбираются варианты с коэффициентом приближенности близким к наибольшему значению, остальные варианты исключаются.

1.6 Методики определения сил резания ножевыми исполнительными органами

В. П. Горячкиным предложена формула по определению сопротивлений при перемещении плуга [76].

$$P_K = fG + Khb + \varepsilon hbV^2, \quad (1.9)$$

где f – коэффициент перемещения плуга; G – вес плуга, Н; h , b – глубина пахоты и ширина плуга, м; K – удельное сопротивление резанию Н/м²; εhbV^2 – сопротивление грунта отбросу в сторону Нс/м³.

Н. Г. Домбровский [77, 78] рассматривает сопротивление резанию, как сумму сопротивлений перемещения призмы волочения, движения грунта в ковше и преодоления сопротивлений трению рабочего органа о грунт.

$$P_{01} = kbh + \mu_1 N + \varepsilon(1 + q_{np})qk_n, \quad (1.10)$$

где b , h – ширина и толщина срезаемого грунта, м; k – удельное сопротивление резанию, Н/м²; N – усилие давления ковша на грунт, Н/м²; μ_1 – коэффициент трения ковша о грунт; ε – коэффициент сопротивления наполнению ковша и перемещению призмы волочения; q_{np} – объем призмы волочения, выраженный в частях емкости q ковша; k_n – коэффициент наполнения ковша.

На практике Н. Г. Домбровским предложена упрощенная формула В.П. Горячкина [77, 78]:

$$P_{01} = k_1 b h, \quad (1.11)$$

где k_1 – удельная сила копания, включающая сопротивление резанию, трение ковша о забой, сопротивление призмы волочения и др., Н/м².

Формула, предложенная А. Н. Зелениным для определения усилий резания [79, 80]:

$$P = Ch \left(1 + 0,55b\right) \left(1 - \frac{90 - \alpha}{150}\right) \mu \Delta, \quad (1.12)$$

где P – усилия резания, кг; C – число ударов динамического плотномера с накопником площадью 1 см²; b – ширина резца, см; h – глубина резания, см; α – угол резания, град; μ – коэффициент блокированности; Δ – коэффициент затупления.

В работе В. Д. Абезгауза приведены теоретические соображения о силе резания, которая определяется в зависимости от предела прочности при сжатии. Выражения, предложенные В. Д. Абезгаузом, имеют вид [81]

$$P_{P1} = hb\sigma_c \left(K_p + K_s \frac{\Delta + e_0 b}{\Delta + e_0 b} \right), \quad (1.13)$$

$$P_{N1} = b\sigma_c K_N (\Delta + e_0 b), \quad (1.14)$$

где b и h – ширина резца и толщина срезаемой стружки грунта, м; σ_c – предел прочности при сжатии, Па; Δ – линейный износ задней поверхности резца, измеренный по траектории резания, м; $e_0 b$ – средняя толщина уплотненного ядра перед передней гранью инструмента; K_p , K_s , K_N – коэффициенты сопротивления резанию, внедрению и вдавливанию.

Значительный вклад в теорию резания грунтов и пород внес Ю. А. Ветров [82-84]. Автором разработан ряд эмпирических формул для определения касательной и нормальной силы резания.

Касательная сила резания одним острым ножом [83-85]:

$$P_{cp} = \varphi m_{cv} b h + 2m_{бок} h^2 + 2m_{бок.ср} h, \quad (1.15)$$

где $\varphi m_{cv} b h$ – силы для преодоления лобовых сопротивлений ножу (P_{cv} на Рисунке 1.13), Н; φ – коэффициент, учитывающий влияние угла резания; m_{cv} – удельная сила резания для преодоления сопротивлений грунта передней гранью при угле резания 45° , Па; b – ширина среза, м; h – глубина среза, м; $2m_{бок} h^2$ – силы разрушения грунта в боковых расширениях прорези (на Рисунке 1.13 обозначено $P_{бок}$), $m_{бок}$ – коэффициент, характеризующий силу разрушения грунта в боковых частях прорези, Па; $2m_{бок.ср} h$ – силы бокового среза (на Рисунке 1.13 обозначено $P_{бок.ср}$), Н; $m_{бок.ср}$ – коэффициент, характеризующий удельную силу среза одним из боковых ребер ножа, Н/м.

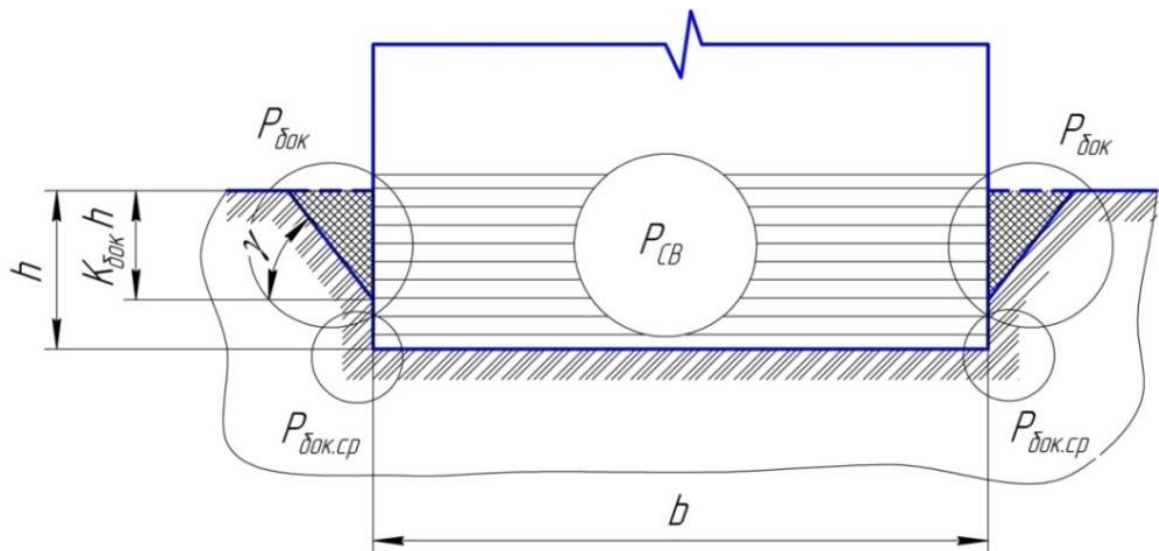


Рисунок – 1.13 Зоны действия составляющих силы резания прямым острым ножом

Из выражения 1.15 касательная сила резания представлена суммой трех составляющих сил резания (Рисунок 1.13) [82-84]:

- составляющая сила для преодоления сопротивления грунта резанию передней гранью ножа $P_{св}$;
- составляющая сила для преодоления сопротивлений грунта разрушению в боковых расширениях прорези $P_{бок}$;
- составляющая сила для преодоления сопротивлений грунта срезу боковыми ребрами ножа у дна прорези $P_{бок. ср.}$

Нормальная сила резания одним острым ножом [82-84]:

$$N = ctg(\delta + \varphi_{тр})P_{ср}, \quad (1.16)$$

где δ – угол резания, град; $\varphi_{тр}$ – угол трения грунта о нож, град.

Определению силовых параметров взаимодействия ножевых ИО геолода с породой забоя, были посвящены работы Аксенов В.В. и Садовца В.Ю. [11, 18, 51]. В данных работах рассматривались ножевые ИО с прямой и наклонной формах режущей кромки ножа. За основу были взяты выражения касательной и нормальной силы резания, разработанные Ветровым Ю.А.

Аксеновым В.В. и Садовцом В.Ю. для определения силовых параметров взаимодействия ножевых ИО геолода с породой забоя был применен подход в соответствии с особенностями работы ИО геолода. При проходке ножи формируют геликоидную поверхность взаимодействия ИО геолода с породой забоя.

Авторами получены выражения для определения проекции полной силы сопротивления грунта резанию на ось вращения геолода (P_0) и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геолода ($R_{ИО}$) (Рисунок 1.14).

Проекция полной силы сопротивления грунта резанию на ось вращения геолода (P_0) и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геолода ($R_{ИО}$), а также момент сопротивления резанию ($M_{ИО}$) для острых ножей [11, 18, 51]

$$P_{o.} = \sin \beta_x P_{ср} - \cos \beta_x N_{ср}; \quad (1.17)$$

$$R_{u.o.} = \cos \beta_x P_{ср} + \sin \beta_x N_{ср}; \quad (1.18)$$

$$M_{u.o.} = bR_{u.o.}. \quad (1.19)$$

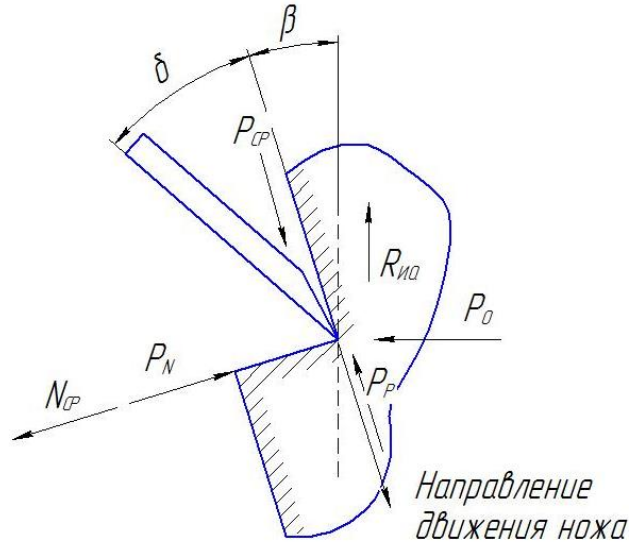


Рисунок 1.14 – Схема к определению сил резанию ножевым исполнительным органом геохода

Аксеновым В.В. и Садовцов В.Ю. предложено разделение проекции полной силы сопротивления грунта резанию на ось вращения геохода и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода на две составляющие, зависящая от ширины среза и независящая.

Авторами получены выражения для определения проекции составляющей силы резания, зависящие от ширины ножа, на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления грунта резанию от этой составляющей [11, 18, 51]:

$$P_{o.c\delta} = \frac{\varphi m_{c\delta} h_B^2}{2\pi n \cos \gamma} \left[\ln \left| \frac{\operatorname{tg} \frac{\beta_2}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\beta_1}{2}} \right| - \frac{(\sin \beta_2 - \sin \beta_1)}{\sin \beta_2 \cdot \sin \beta_1} \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{mp}) \right]; \quad (1.20)$$

$$R_{u.o.c\delta} = \frac{\varphi m_{c\delta} h_B^2}{2\pi n \cos \gamma} \left[\frac{(\sin \beta_2 - \sin \beta_1)}{\sin \beta_2 \cdot \sin \beta_1} + \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{mp}) \ln \left| \frac{\operatorname{tg} \frac{\beta_2}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\beta_1}{2}} \right| \right]; \quad (1.21)$$

$$M_{u.o.c\delta} = \frac{\varphi m_{c\delta} h_B^3}{8\pi^2 n \cos \gamma_n} \left[\ln \left| \frac{\operatorname{tg} \frac{\beta_1}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\beta_2}{2}} \right| + \frac{\cos \beta_1}{\sin^2 \beta_1} - \frac{\cos \beta_2}{\sin^2 \beta_2} + 2 \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{mp}) \frac{(\sin \beta_2 - \sin \beta_1)}{\sin \beta_2 \cdot \sin \beta_1} \right]. \quad (1.22)$$

Проекции составляющей силы резания, независимые от ширины ножа, на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления грунта резанию от этой составляющей [11, 18, 51]:

$$P_{o.бок} = \frac{h_B}{n} \left(m_{бок} \frac{h_B}{n} + m_{бок.ср} \right) \left[-\frac{\cos(\delta + \varphi_{mp} + \beta_1) + \cos(\delta + \varphi_{mp} + \beta_2)}{\sin(\delta + \varphi_{mp})} \right]; \quad (1.23)$$

$$R_{u.o.бок} = \frac{h_B}{n} \left(m_{бок} \frac{h_B}{n} + m_{бок.ср} \right) \left[\frac{\sin(\delta + \varphi_{mp} + \beta_1) + \sin(\delta + \varphi_{mp} + \beta_2)}{\sin(\delta + \varphi_{mp})} \right]; \quad (1.24)$$

$$M_{u.o.бок} = \frac{h_B}{n} \left(m_{бок} \frac{h_B}{n} + m_{бок.ср} \right) \left[\frac{r_z \sin(\delta + \varphi_{mp} + \beta_1) + r_o \sin(\delta + \varphi_{mp} + \beta_2)}{\sin(\delta + \varphi_{mp})} \right]. \quad (1.25)$$

При наличии лучей на ИО геохода полная проекция силы резания на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также полный момент сопротивления грунта резанию [11, 18, 51]:

$$P_o = n(P_{o.св} + P_{бок}); \quad (1.26)$$

$$R_{u.o} = n(R_{u.o.св} + R_{u.o.бок}); \quad (1.27)$$

$$M_{u.o} = n(M_{u.o.св} + M_{u.o.бок}). \quad (1.28)$$

Полученные зависимости (1.20) – (1.28) Аксеновым В.В. и Садовцом В.Ю. позволяют определять силовые параметры взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя при прямой и наклонной формах режущей кромки ножа. При разработке данных методик авторами не учтено влияние угла перемещения точек ножа ИО геохода на забой выработки на толщину срезаемого уступа, а также криволинейная форма режущей кромки ножа.

1.7 Методики определения энергоемкости разрушения горных пород

Одним из главных показателей оценки силовых и геометрических параметров исполнительного органа горнопроходческой машины, является энергоемкость разрушения породы забоя.

Для определения энергоемкости разрушения породы забоя разработаны разные методики. Но термин "энергоемкость разрушения породы забоя" общепринятый и означает количество работы, затраченной на разрушение единицы объема или массы горной породы [85].

Ананьевым К.А., получено выражения для определения энергоемкости разрушения породы забоя роторным исполнительным органом с резцами (H_w , кВт·ч/м³) [71]:

$$H_w = \frac{2\pi M}{3600W_{об}}, \quad (1.29)$$

где M – момент, затрачиваемый на резание, кНм; $W_{об}$ – объем разрушенной породы за один оборот, м³.

В работе Малевича Н.А. [67] энергоемкость разрушения породы забоя резцовым инструментом (H_w , МДж/м³), определяется из выражения:

$$H_w = \frac{Z}{th}, \quad (1.30)$$

где Z – усилие резания, Н; t – шаг разрушения, мм; h – толщина стружки, мм.

В работах Ветрова Ю.А. [83] энергоемкостью разрушения породы забоя является удельная сила резания грунта землеройной машиной.

Удельная сила резания (p , МДж/м³), определяет из выражения:

$$p = \frac{P}{F_{cp}}, \quad (1.31)$$

где P – сила резания, Н; F_{cp} – площадь поперечного сечения прорези, мм².

В методике, предложенной Ананьевым К.А., кинематика движения ИО представлена не только поступательным движением на забой, но и вращательным вокруг оси проходческого агрегата. Исходя из этого суммарным моментом сил резания представлен в числителе, а объем разрушенной горной массы за один оборот ИО вокруг оси проходческого агрегата [86, 87].

Различие в кинематике движения приводит к различию единицы измерения. Так по методике Ананьева К.А. – кВт·ч/м³, при остальных – МДж/м³.

Выражения для определения энергоемкости разрушения породы забоя являются тождественно равными при переводе в одни и те же единицы измерения и соответствуют термину энергоемкости разрушения породы забоя.

1.8 Выводы

1) Строительство подземных объектов различного назначения в мире имеет тенденцию к значительному росту. Подземные сооружения, как правило, строятся на небольших глубинах, которым характерны породы с коэффициентом крепости до $f = 1$ ед. по шкале М.М. Протодяконова.

2) Характеру работы ИО геохода присущ ряд особенностей, отличающий от характера работы других подземных агрегатов.

3) ПВ с уступом приводит к снижению энергоёмкости разрушения породы забоя по сравнению с плоским забоем.

4) Основными разрушающими инструментами при проходке по мягким породам относятся резцы и ножи.

5) Полнота удовлетворения предъявляемым требованиям к ИО геохода зависит не только от выбора типа ИО и его параметров, а также от их увязки с параметрами внешнего движителя

6) Выбор единственного наилучшего варианта, либо группы наиболее предпочтительных вариантов обеспечивает метод TOPSIS.

7) Полученные зависимости в работах Аксенова В.В. и Садовца В.Ю. позволяют определять силовые параметры взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя при прямой и наклонной формах режущей кромки ножа. При разработке данных методик авторами не учтено влияние угла перемещения точек ножа ИО геохода на забой выработки на толщину срезаемого уступа, а также криволинейная форма режущей кромки ножа.

8) Выражения для определения энергоемкости разрушения породы забоя являются тождественно равными при переводе в одни и те же единицы измерения и соответствуют термину энергоемкости разрушения породы забоя.

Сдерживающим фактором при разработке ИО геохода для разрушения мягких пород является отсутствие научно-технических и научно-методических разработок направленных на:

- обоснование силовых параметров ИО геохода, учитывающих криволинейную форму режущей кромки ножа;
- обоснование энергетических параметров ИО геохода.

В результате проведенного анализа состояния вопроса сформулирована **цель работы:** обоснование силовых и энергетических параметров исполнительного органа геохода для разрушения мягких пород.

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

- 1) Разработать схемные решения ИО геохода для разрушения мягких пород.
- 2) Усовершенствовать математическую модель взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя.
- 3) Определить влияние конструктивных решений ИО геохода на силовые и энергетические параметры взаимодействия его с породой забоя.
- 4) Разработать ножевой исполнительный орган демонстрационного образца геохода.

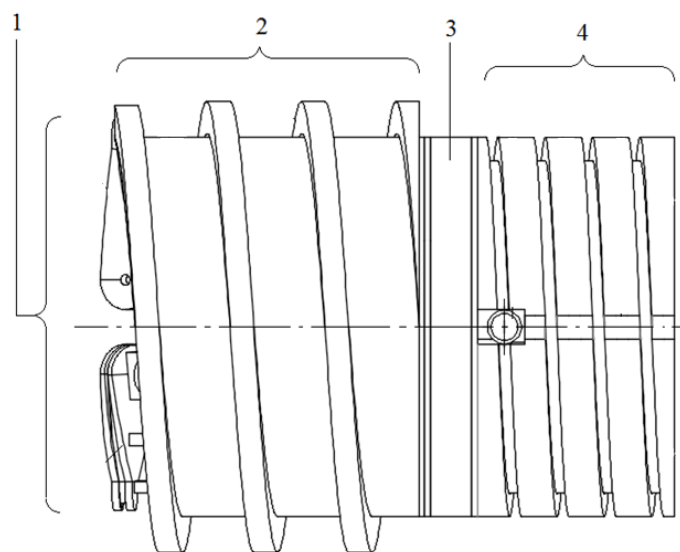
2 РАЗРАБОТКА СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГЕОХОДА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ МЯГКИХ ПОРОД

Для решения поставленной задачи необходимо:

- выявить особенности работы ИО геохода с изгибающимся корпусом;
- сформировать дополнительные специальные требования к ИО геохода с изгибающимся корпусом;
- разработать схемные решения ИО геохода для разрушения мягких пород;
- произвести анализ схемных решений ИО геохода для разрушения мягких пород на соответствие предъявляемым к ним требованиям.

2.1 Особенности работы исполнительного органа геохода с изгибающимся корпусом

Коллективом авторов разработано техническое решение геохода с изгибающимся корпусом [28] (Рисунок 2.1) для проходки криволинейных горных выработок. Данное направление расширяет особенности работы ИО геохода.



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

Рисунок 2.1 – Общий вид геохода с изгибающимся корпусом

Для обеспечения необходимой маневренности изменяется положение оси вращения ИО геохода.

При формировании винтовой поверхности взаимодействия ИО геохода с породой забоя режущий инструмент, расположенный на периферии, и инструмент, расположенный в центральной части, перемещаются на забой под разными углами перемещения точек ножа ИО геохода на забой выработки [46, 51]. В точке, расположенной на оси геохода, угол перемещения равен 90° , что приводит к вдавливанию режущего инструмента в породы забоя. Еще одной особенностью работы ИО геохода является различный подход к разрушению породы в центральной и периферийной частях забоя.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что необходимо дополнить особенности работы ИО геохода:

- позволяет изменять положение оси вращения ИО геохода;
- различный подход к разрушению породы в центральной и периферийной частях забоя.

2.2 Формирование дополнительных специальных требований к исполнительному органу геохода с изгибающимся корпусом

В п. 1.4 представлены общие и специальные требования к ИО геохода.

Разработанная конструкция геохода с изгибающимся корпусом [28], расширяет требования к ИО геохода. ИО должен не препятствовать изгибанию корпуса геохода. То есть ИО геохода должен формировать форму забоя, не препятствующую изгибанию корпуса.

С увеличением маневренности, работа ИО геохода должна обеспечивать разрушение забоя в заданном направлении.

Установка забурника в центральной части ИО ведет к обеспечению прямолинейного движения, но отрицательно сказывается на возможности маневрирования машины. Обеспечение маневренности геохода накладывает требование на отсутствие забурника.

Еще одним специальным требованием к ИО геохода стоит добавить различный подход к разрушению породы в центральной и периферийной частях забоя. Ножевые ИО позволяют разрушать центральную часть забоя ножом за счет сил в боковых расширениях прорези (Рисунок 1.10).

Таким образом, необходимо дополнить специальные требования к ИО геохода еще несколькими:

- ИО геохода должен формировать форму забоя, не препятствующую изгибанию корпуса;
- работа ИО геохода должна обеспечивать разрушение забоя в заданном направлении;
- отсутствие забурника в центральной части;
- различный подход к разрушению породы в центральной и периферийной частях забоя.

Сформулированные дополнительные специальные требования должны учитываться при разработке схемных и конструктивных решений ИО геохода.

2.3 Разработка схемных решений исполнительного органа геохода для разрушения мягких пород

С учетом особенностей работы и требований к ИО геохода для разрушения мягких пород разработаны варианты схемных решений ИО геохода (Рисунок 2.2), которые позволяют получать различные формы поверхности взаимодействия инструмента с породой забоя [88, 89].

На рисунке 2.2 (а) представлена конструкция ножевого ИО с разным числом режущих элементов относительно центра вращения геохода для разрушения мягких пород [90].

При таком расположении режущих элементов выполняется условие, что каждый элемент разрушает одинаковый объем породы за один оборот движения

геохода. Так же преимуществом является то, что ИО вращается совместно с головной секцией геохода, что не требует дополнительного привода ИО.

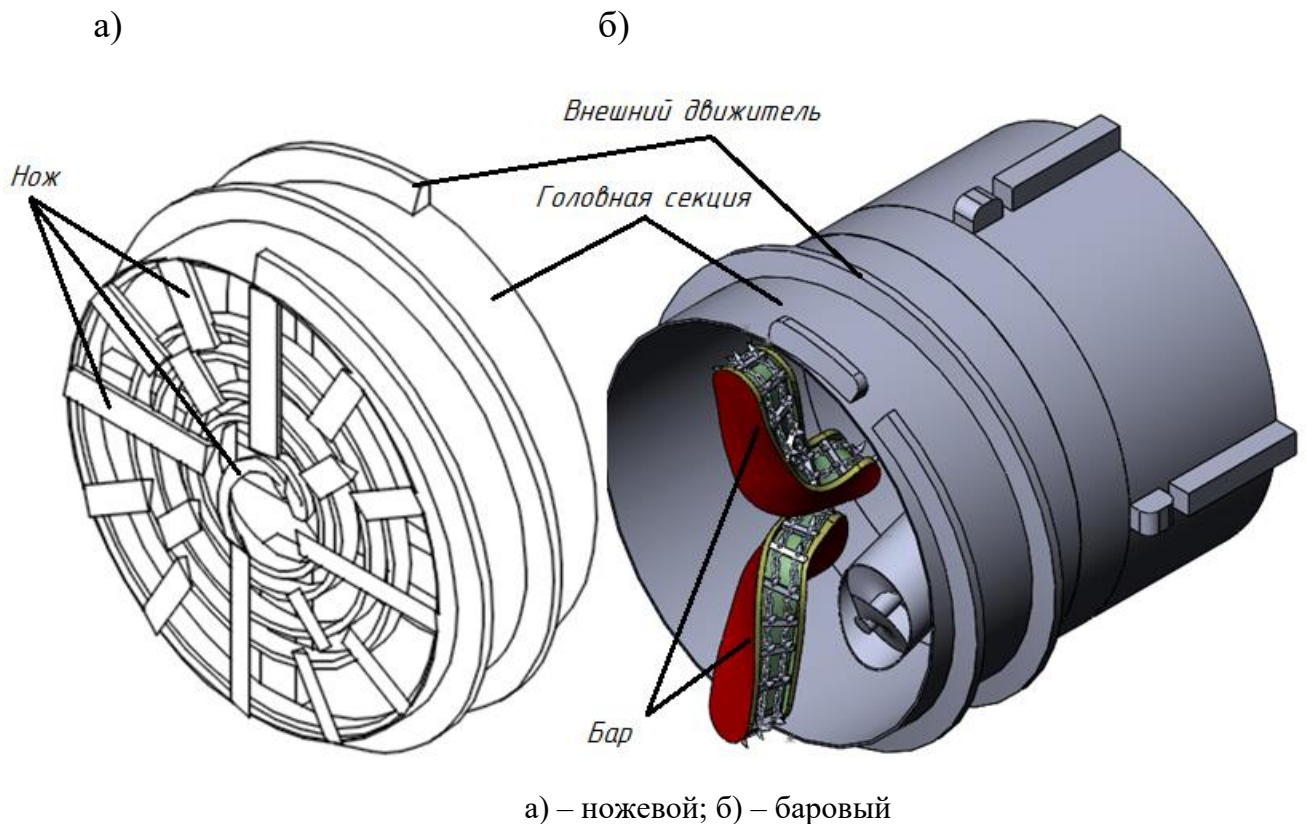


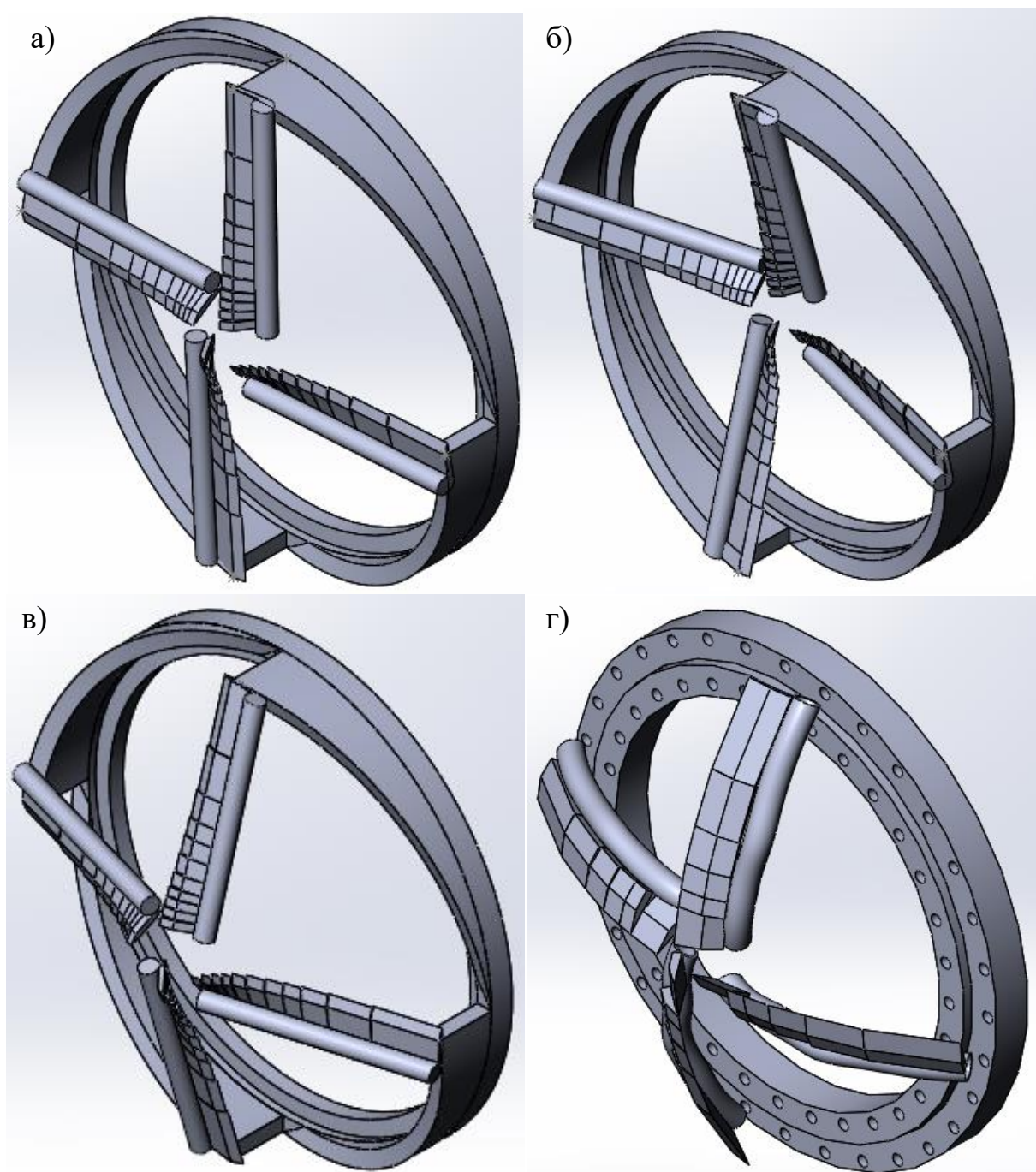
Рисунок 2.2 – Конструктивные решения ИО геохода

На рисунке 2.2 (б) представлена конструкция барового (цепного) ИО геохода. Исполнительный орган представляет собой бар, который состоит из плиты. Плита имеет форму геликоида и образует вогнутость в центре. Преимуществом данного ИО является возможно менять режущий инструмент и тем самым проводить выработки по более крепким породам.

С учетом конструкционной возможности изменения формы режущей кромки ножа, появляется возможность получить ряд вариантов схемных решений ножевых ИО геоходов для разрушения мягких пород, некоторые из которых представлены на рисунках 2.3 и 2.4.

На рисунках 2.3 и 2.4 представлены схемные варианты ножевых ИО геохода образующие уступ геликоидной формы. В отличие от ножей образующих плоский

уступ, изображенных на рисунке 2.2 (а), геликоидная форма уступа соответствует особенностям работы ИО геохода.

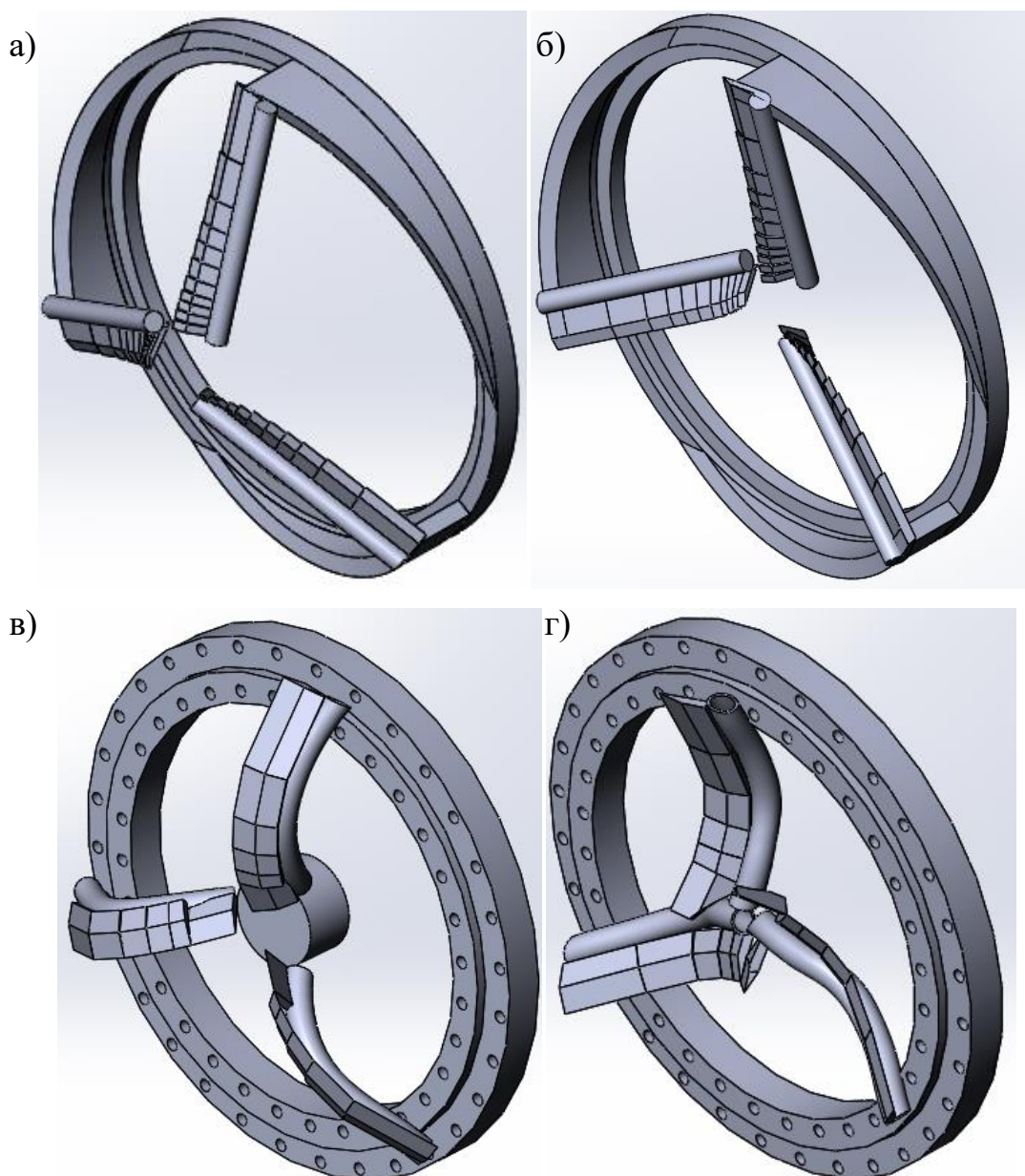


а) – плоская форма режущей кромки ножа; б, в) – наклонная форма режущей кромки ножа; г) – полувыпуклая форма режущей кромки ножа

Рисунок 2.3 – Схемные варианты четырехлучевого ножевого ИО геохода с различной формой режущей кромки ножа

Для создания геликоидности нож выполнен сборным из элементов (рисунок

2.3, 2.4) повернутыми на угол β_x (Рисунок 1.6), где x расстояние от центра вращения до середины элемента.



а, б) – наклонная форма режущей кромки ножа; в) – выпуклая форма режущей кромки ножа; г) – вогнутая форма режущей кромки ножа

Рисунок 2.4 – Схемные варианты трехлучевого ножевого ИО геохода с различной формой режущей кромки ножа

На рисунке 2.3 представлены варианты четырехлучевого ножевого ИО геохода, которые образуют различные формы поверхности взаимодействия ИО геохода с породой забоя. Так вариант, образующий плоскую форму ПВ (Рисунок

2.3, а) является традиционной формой при проходке тоннелей щитовым способом. При данной схеме ножи расположены перпендикулярно оси вращения геогода.

При наклонной форме режущей кромки ножа на угол $\gamma_{ио}$ ИО формирует забой конической формы. Конус может быть как выпуклым (Рисунок 2.3, б), так и вогнутым (обратным) (Рисунок 2.3, в) относительно геогода. Данные схемы позволяют удерживать направление относительно оси геогода, но при этом уменьшают маневренность машины.

ИО геогода (Рисунок 2.3, г), образующий забой полувыпуклой формы, повышает маневренность.

Непосредственно ИО геогода может состоять из разного числа лучей. На рисунке 2.4 показаны варианты трехлучевого ножевого ИО геогода для разрушения мягких пород.

Схемные варианты ИО геогода, изображенные на рисунке 2.4, а, б, образуют поверхность взаимодействия ИО геогода с породой забоя конусной формы. Ножевые ИО геогода, образующие ПВ выпуклой и вогнутой формы (Рисунок 2.4, в, г) отличаются от ИО полувыпуклой формой тем, что на периферии образуют полувыпуклую форму, а в центре конус. ИО выпуклой формы (Рисунок 2.4, в) так же, как ИО геогода полувыпуклой формы повышают маневренность машины, но при этом ближе к оси выработки образовывая рациональную форму образующей [48].

На основании разработанных конструктивных вариантов ножевого исполнительного органа геогода разработана классификация ножевых ИО геогода (Рисунок 2.5) по признакам [91-93].

Признаки классификации ножевых ИО геогода:

1) Расположение относительно поверхности забоя:

- выпуклое в массив (Рисунок 2.3, в, г; Рисунок 2.4, а, в);
- прямое (Рисунок 2.3, а);
- вогнутое (Рисунок 2.3, б; Рисунок 2.4, б, г).

2) Форма режущей кромки ножа:

- прямая (Рисунок 2.3, а);

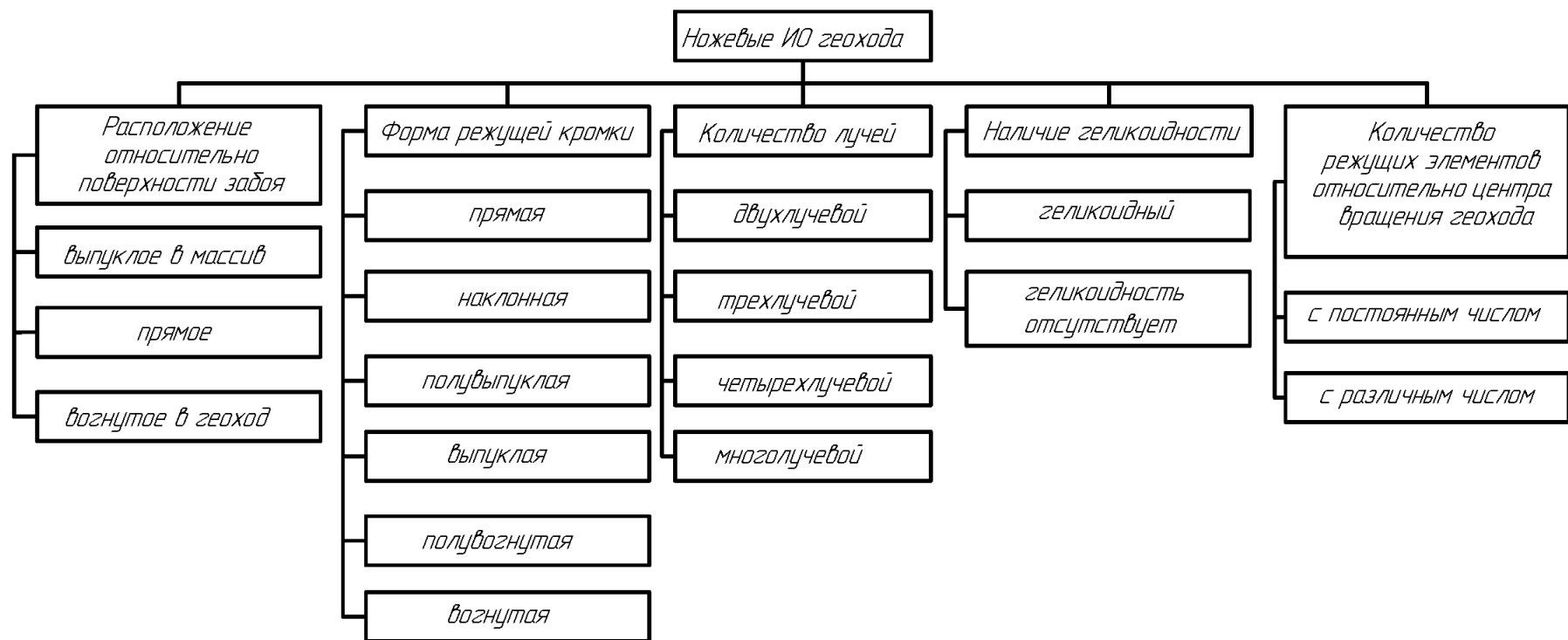


Рисунок 2.5 – Классификация ножевых ИО геолода для разрушения мягких пород

- наклонная (Рисунок 2.3, б, в; Рисунок 2.4, а, б);
- радиально-конусная;
- вогнутая (форма шара) (Рисунок 2.3, г);
- окружная (форма тора) (Рисунок 2.4, в, г).

3) Количество лучей:

- двухлучевой;
- трехлучевой (Рисунок 2.4);
- четырехлучевой (Рисунок 2.3);
- многолучевой.

4) Наличие геликоидности:

- геликоидность отсутствует (Рисунок 2.2, а);
- геликоидный (Рисунок 2.3, 2.4).

5) Количество режущих элементов относительно центра вращения геохода:

- с постоянным числом (Рисунок 2.3, 2.4);
- с различным числом (Рисунок 2.2, а).

Таким образом, на основании особенностей работы ИО геохода, а также предъявляемым к ним требованиям разработаны схемные решения ИО геохода для разрушения мягких пород. Разработана их классификация.

2.4 Анализ схемных решений исполнительного органа геохода для разрушения мягких пород на соответствие предъявляемым к ним требованиям

Анализа соответствия схемных решений ИО геохода к предъявляемым требованиям производится методом TOPSIS. Который относится к методам многокритериального анализа MCDA.

Исходными данными для выбора схемного решения ИО геохода методом TOPSIS является матрица решений (таблица 2.1), включающая в себя оценки альтернатив по критериям, а также веса критериев. Альтернативами в данном случае

являются варианты схемных решений ИО геохода, а критериями служат требования к ним [94].

Таблица 2.1 – Матрица решений

Альтернативы	Критерии оценки					
	АБ1	АБ2	АБ3	АБ4	АБ5	АБ6
	Вес критерия w_i					
	0,9	0,8	0,6	0,5	0,6	0,5
АА1	2	6	5	4	1	1
АА2	3	6	5	5	7	7
АА3	1	6	6	4	7	7
АА4	7	6	6	5	7	7
АА5	4	6	5	4	7	7
АА6	4	6	5	3	7	7
АА7	1	6	6	4	7	7
АА8	7	6	6	5	7	7
АА9	7	6	6	5	7	7

Схемные решения ножевых ИО геохода представлены на рисунках 2.2 (а), 2.3 и 2.4. Для упрощения каждое схемное решение обозначено индексом в скобках:

- прямой ножевой ИО с разным числом режущих элементов относительно центра вращения геохода с прямой формой режущей кромки ножа (Рисунок 2.2, а) (АА1);
- прямой геликоидный ножевой ИО геохода с прямой формой режущей кромки ножа (Рисунок 2.3, а) (АА2);
- прямой геликоидный ножевой ИО с разным числом режущих элементов относительно центра вращения геохода с прямой формой режущей кромки ножа (АА3);
- вогнутый геликоидный ножевой ИО геохода с наклонной формой режущей кромки ножа (Рисунок 2.3, б) (АА4);

- вогнутый геликоидный ножевой ИО геохода с вогнутой формой режущей кромки ножа (Рисунок 2.4, г) (АА5);
- геликоидный ножевой ИО геохода с полувогнутой формой режущей кромки ножа (АА6);
- выпуклый геликоидный ножевой ИО геохода с наклонной формой режущей кромки ножа (Рисунок 2.3, в) (АА7);
- выпуклый геликоидный ножевой ИО геохода с выпуклой формой режущей кромки ножа (Рисунок 2.4, в) (АА8);
- выпуклый геликоидный ножевой ИО геохода с полувыпуклой формой режущей кромки ножа (Рисунок 2.3, г) (АА9).

Полный список представленных выше требований к ИО геохода учитывать не будет, так для ряда требований необходимо определять количественные показатели. Поэтому для анализа нами приняты требования и даны им индексы для упрощения ввода:

- формировать форму забоя обеспечивающую изгибание корпуса (АБ1);
- возможность непрерывного перемещения геохода на забой, в том числе в неустойчивых породах (АБ2);
- обеспечение монтажа ограждающей оболочки, исключаящей вывалы из груди забоя (АБ3);
- свободный доступ к функциональным элементам исполнительного органа для ремонта, замены и модификации (АБ4);
- соответствие геометрических параметров ИО геохода, параметрам винтового движителя (АБ5);
- различный подход к разрушению породы в центральной и периферийной частях забоя (АБ6).

Для сравнения разных оценок альтернатив выполняется метод идеальной нормализации.

На этапе нормализации по выражению (1.4) происходит деление оценок на наибольшую в каждом столбце.

Рассчитанные значения r_{ai} сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Значения r_{ai} при идеальной нормализации

Альтернативы	r_{ai}					
	АБ1	АБ2	АБ3	АБ4	АБ5	АБ6
АА1	0,285	1	0,833	0,8	0,143	0,143
АА2	0,429	1	0,833	1	1	1
АА3	0,143	1	1	0,8	1	1
АА4	1	1	1	1	1	1
АА5	0,571	1	0,833	0,8	1	1
АА6	0,571	1	0,833	0,6	1	1
АА7	0,143	1	1	0,8	1	1
АА8	1	1	1	1	1	1
АА9	1	1	1	1	1	1

Далее определяются весовые нормализованные коэффициенты по выражению (1.5).

Рассчитанные значения v_{ai} представляются весовой нормализованной матрицей решений (таблица 2.3).

Весовые нормализованные коэффициенты используются для сравнения v_{ai} с наибольшим (v_i^+) и наименьшим (v_i^-) коэффициентом, выбираемым для каждого критерия по таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Весовая нормализованная матрица решений

Альтернативы	v_{ai}					
	АБ1	АБ2	АБ3	АБ4	АБ5	АБ6
АА1	0,257	0,8	0,5	0,4	0,086	0,072
АА2	0,386	0,8	0,5	0,5	0,6	0,5
АА3	0,129	0,8	0,6	0,4	0,6	0,5
АА4	0,9	0,8	0,6	0,5	0,6	0,5
АА5	0,514	0,8	0,5	0,4	0,6	0,5
АА6	0,514	0,8	0,5	0,3	0,6	0,5
АА7	0,129	0,8	0,6	0,4	0,6	0,5
АА8	0,9	0,8	0,6	0,5	0,6	0,5
АА9	0,9	0,8	0,6	0,5	0,6	0,5

Значения коэффициентов v_i^+ и v_i^- для каждого критерия представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Матрица наибольших и наименьших коэффициентов

Коэффициенты	Критерии оценки					
	АБ1	АБ2	АБ3	АБ4	АБ5	АБ6
v^+	0,9	0,8	0,6	0,5	0,6	0,5
v^-	0,129	0,8	0,5	0,3	0,086	0,072

Далее определяется приближенность каждого весового нормализованного коэффициента v_{ai} (таблица 2.3) к наибольшему и наименьшему коэффициенту по выражениям (1.6) и (1.7).

Вычисленные данные приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Приближенность показателей

	АА1	АА2	АА3	АА4	АА5	АА6	АА7	АА8	АА9
d_a^+	0,939	0,524	0,778	0	0,411	0,446	0,778	0	0
d_a^-	0,162	0,744	0,684	1,0	0,779	0,772	0,684	1,0	1,0
C_a	0,147	0,587	0,468	1,0	0,655	0,633	0,468	1,0	1,0

Окончательным коэффициентом для выбора схемного решения ИО геохода для разрушения мягких пород является относительный коэффициент приближенности к идеалу определяют по выражению (1.8).

Относительные коэффициенты приближенности записаны в таблице 2.5.

Субъективность введенных оценок альтернатив по критериям не позволяет на данном этапе выбрать лучший вариант, однако худшие варианты (АА1, АА2, АА3, АА5, АА6, АА7) принято исключить из дальнейшего рассмотрения.

По итогам анализа, наиболее полно удовлетворяют требованиям ИО геохода схемные варианты ножевых ИО:

– вогнутый геликоидный с наклонной формой режущей кромки ножа (Рисунок 2.3, б) (АА4);

- выпуклый геликоидный с выпуклой формой режущей кромки ножа (Рисунок 2.4, в) (АА8);

- выпуклый геликоидный с полувыпуклой формой режущей кромки ножа (Рисунок 2.3, г) (АА9).

Эти схемные решения ножевых ИО геоходов для разрушения мягких пород приняты к дальнейшему рассмотрению.

2.5 Выводы

1) Дополнены особенности работы ИО геохода на основе которых 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.

2) Разработаны схемные и конструктивные решения ИО геохода для разрушения мягких пород. Разработана их классификация.

3) Установлено, что наиболее полно предъявляемым требованиям отвечают ножевые ИО геохода:

- вогнутый геликоидный с наклонной формой режущей кромки ножа;
- геликоидный с выпуклой формой режущей кромки ножа;
- геликоидный с полувыпуклой формой режущей кромки ножа.

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

3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НОЖЕВОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГЕОХОДА С ПОРОДОЙ ЗАБОЯ

Для решения задачи по усовершенствованию математической модели взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя необходимо:

- сформировать исходные данные;
- определить силы резания при различных формах режущей кромки ножа;
- определить закономерности формирования суммарных усилий резания на ножевых исполнительных органах геохода;
- определить энергоемкость разрушения породы забоя ножевым ИО геохода.

3.1 Формирование исходных данных

Согласно п. 2.5. выбраны варианты ИО геохода:

- вогнутый геликоидный с наклонной формой режущей кромки ножа (Рисунок 2.3, б);
- выпуклый геликоидный с выпуклой формой режущей кромки ножа (Рисунок 2.4, в);
- выпуклый геликоидный с полувыпуклой формой режущей кромки (Рисунок 2.3, г).

Выбранным вариантам ИО геохода соответствуют формы режущих кромок ножей:

- наклонная;
- выпуклая;
- полувыпуклая.

Для выявления геометрических параметров ножевых ИО геолода с различными формами режущей кромки ножа рассмотрены зоны действия сил резания острым ножом для каждого варианта.

На рисунке 3.1 изображены зоны действия сил резания острым ножом с наклонной формой режущей кромки ножа.

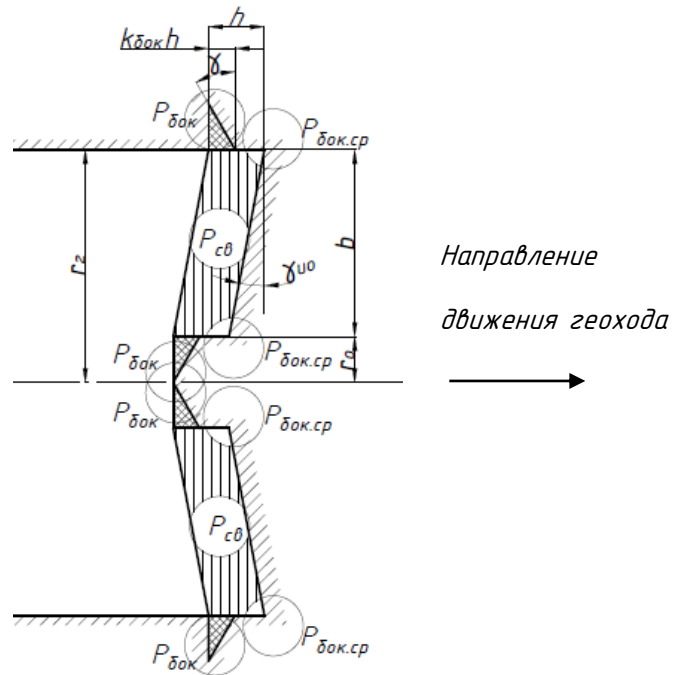


Рисунок – 3.1 Схема действия сил резания ножевым ИО геолода с наклонной формой режущей кромки ножа

Из рисунка 3.1 следует, что геометрическими параметрами конструктивного решения ИО геолода для разрушения мягких пород с наклонной формой режущей кромки ножа являются радиус геолода r_z , который состоит из ширины резания b и радиуса образующей r_0 , глубина резания h , а также угол наклона ножа к плоскости, перпендикулярной оси вращения геолода $\gamma_{ио}$.

К параметрам конструктивного решения ИО геолода для разрушения мягких пород с полувыпуклой формой режущей кромки ножа (Рисунок 3.2), относятся радиус геолода r_z , который состоит из ширины резания b и радиуса образующей r_0 , глубина резания h , а также радиус кривизны режущей кромки ножа $r_{кр}$ с центром расположенным на оси выработки.

При несовпадении центра кривизны режущей кромки ножа с осью геохода, форма режущей кромки ножа станет выпуклой (Рисунок 3.3).

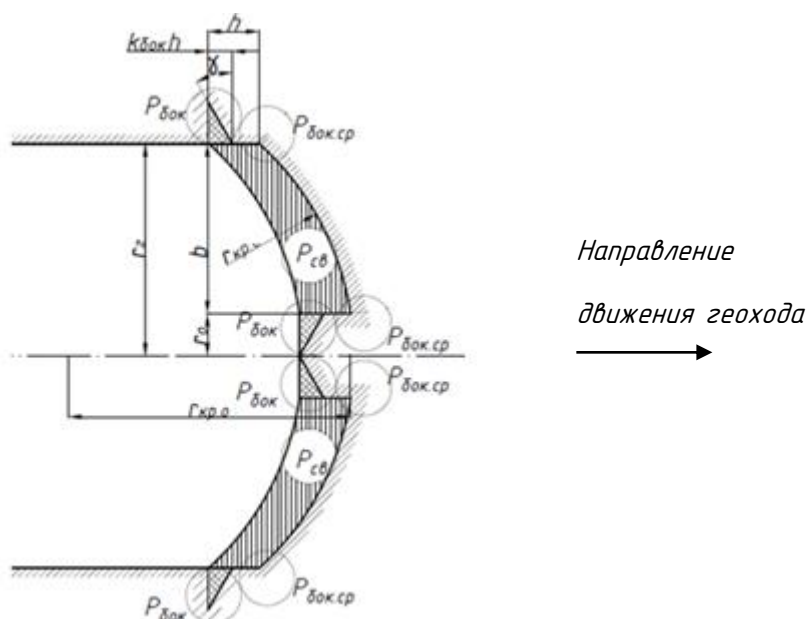


Рисунок – 3.2 Схема действия сил резания ножевым ИО геохода с полувыпуклой формой режущей кромки ножа

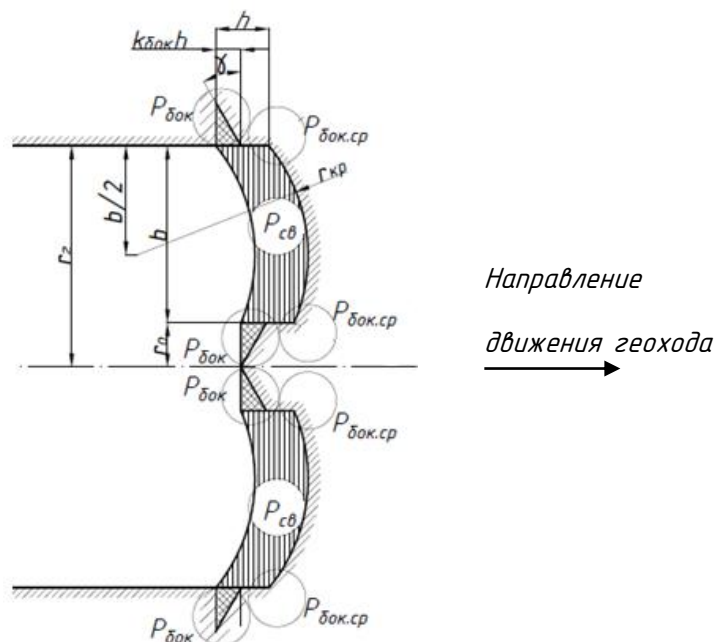


Рисунок – 3.3 Схема действия сил резания ножевым ИО геохода с выпуклой формой режущей кромки ножа

Из Рисунка 3.3 следует, что геометрическими параметрами конструктивного решения ИО геохода для разрушения мягких пород с выпуклой формой режущей

кромки ножа являются радиус геохода r_z , который состоит из ширины резания b и радиуса образующей r_0 , глубина резания h , а также радиус кривизны режущей кромки ножа $r_{кр}$ с центром расположенным на расстоянии $b/2$ от контура выработки.

Геометрические параметры конструктивных решений ИО геохода для разрушения мягких пород с различной формой режущей кромки ножа можно разделить на две группы: общие, которые характерны для каждого варианта ИО, и вариативные, которые свойственны каждому варианту отдельно.

К общим геометрическим параметрам конструктивных решений ИО геохода для разрушения мягких пород относятся радиус геохода r_z , ширина резания b , радиуса образующей r_0 , глубина резания h [95].

Из выражения (1.3) глубина резания зависит от шага внешнего движителя, количества лучей на ИО и угла перемещения точки ножа ИО геохода на забой. Остальные параметры относятся к вариативным и характеризуют каждый вариант ИО геохода отдельно.

Полученные параметры конструктивных решений ИО геохода для разрушения мягких пород представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Геометрические параметры конструктивных решений ИО геохода для разрушения мягких пород

Обозначение	Наименование параметра
Общие параметры	
r_z	радиус геохода
b	ширина резания
r_0	радиус образующей
$h_в$	шаг внешнего движителя
n	количество лучей на ИО
Вариативные параметры	
$\gamma_{ио}$	угол наклона ножа к плоскости, перпендикулярной оси вращения геохода
$r_{кр}$	радиус кривизны режущей кромки ножа с центром, расположенным на оси выработки.
$r_{кр}$	радиус кривизны режущей кромки ножа с центром, расположенным на расстоянии $b/2$ от контура выработки

Таким образом, определены геометрические параметры конструктивных решений ИО геолода (r_z – радиус головной секции геолода, r_o – радиус образующей, h_g – шаг внешнего движителя, n – количество лучей на ИО геолода, $\gamma_{но}$ – угол наклона ножа при наклонной форме режущей кромки ножа, $r_{кр}$ – радиус кривизны режущей кромки при полувыпуклой и выпуклой форме ножа). Полученные параметры делятся на две группы: общие (r_z – радиус головной секции геолода, r_o – радиус образующей, h_g – шаг внешнего движителя, n – количество лучей на ИО геолода), которые характерны для каждого варианта ИО, и вариативные ($\gamma_{но}$ – угол наклона ножа при наклонной форме режущей кромки ножа, $r_{кр}$ – радиус кривизны режущей кромки при полувыпуклой и выпуклой форме ножа), которые свойственны каждому варианту.

3.2 Определение сил резания при различных формах режущей кромки ножа

В работах Ветрова Ю.А. сила резания ножевым исполнительным органом представлена суммой векторов касательной и нормальной составляющих силы резания [83-85]. У автора ножевой ИО представлен простым ножом прямоугольной формы с прямой режущей кромкой.

При определении влияния формы режущей кромки ножа на касательную (1.15) и нормальную (1.16) составляющие силу блокированного резания, принимаем следующие допущения: нож углубляется в массив на всю глубину резания и форма ПВ ножевого ИО с породой забоя соответствует форме режущей кромки ножа.

При резании мягких пород одним ножом, имеющем выпуклую режущую кромку ножа (Рисунок 3.4), касательная сила блокированного резания, возникающая при резании, состоит из трех составляющих сил (Рисунок 1.13).

Форма режущей кромки ножа влияет на силу для преодоления лобового сопротивления ножу при резании (на Рисунках 1.13 и 3.4 обозначено P_{cs}).

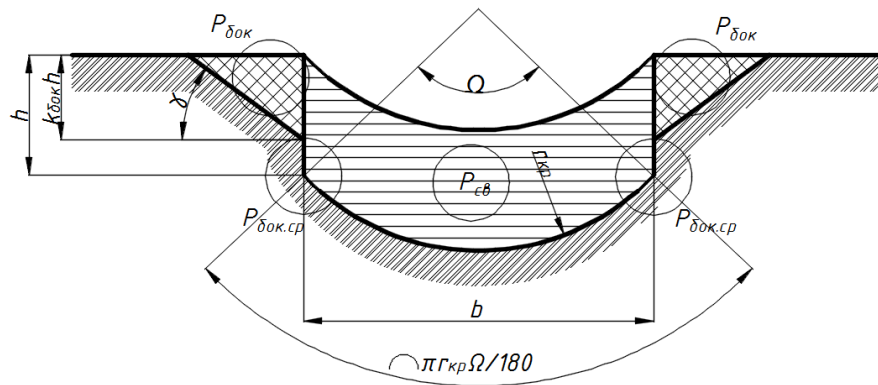


Рисунок 3.4 – Схема действия сил резания ножевым ИО с выпуклой формой режущей кромки ножа

Из выражения (1.15) $\varphi m_{св} b h$ – произведение параметров среды на площадь среза (S) в лоб ножа (Рисунок 1.13). При сферической форме режущей кромки ножа (Рисунок 3.4) необходимо определить площадь среза ($S_{сф}$) в лоб ножа.

Из Рисунка 3.4 геометрическая фигура является сложной формы, для нахождения площади необходимо разбить фигуру на элементарные фигуры (Рисунок 3.5).

Из Рисунка 3.5 фигуры 1 и 3 – круговые сегменты, а фигура 2 и 3 образуют вместе прямоугольник со сторонами b и h . Фигуры 1 и 3 являются одинаковыми и имеют одинаковую площадь, так как фигура 3 представляет собой фигуру 1 при предыдущем срезе.

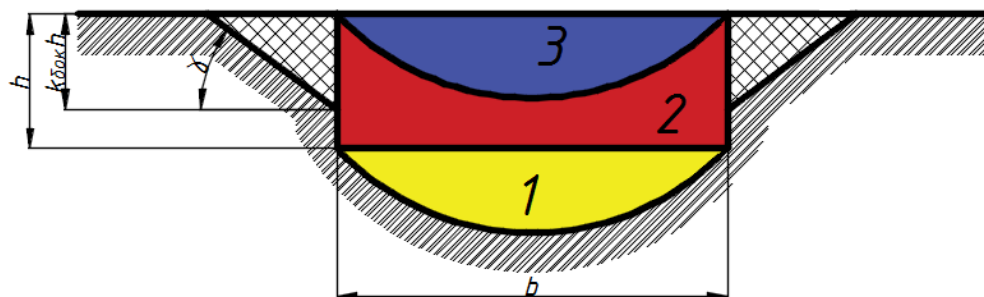


Рисунок 3.5 – Элементарные фигуры, образующие срез выпуклой формой режущей кромки ножа

С учетом вышесказанного, площадь среза в лоб ножа с выпуклой формой режущей кромки ножа равна

$$S_{сф} = bh, \quad (3.1)$$

где b - ширина среза, м; h - глубина резания, м.

Так как ширина ножа и ширина среза одно и тоже, то силы преодоления лобовых сопротивлений ножу $P_{св}$ будут одинаковыми, как для ножа прямой формы, так и для ножа с выпуклой формой режущей кромки при равных значениях b и h .

Следовательно, касательная сила блокированного резания не зависит от выпуклой формы режущей кромки [96, 97].

Полувыпуклая форма режущей кромки является частным случаем выпуклой формы, значит касательная сила блокированного резания также не зависит от полувыпуклой формы режущей кромки

При резании мягких пород одним ножом с наклонной режущей кромкой с углом наклона $\gamma_{но}$ касательная сила блокированного резания состоит из суммы трех составляющих сил (Рисунок 3.6).

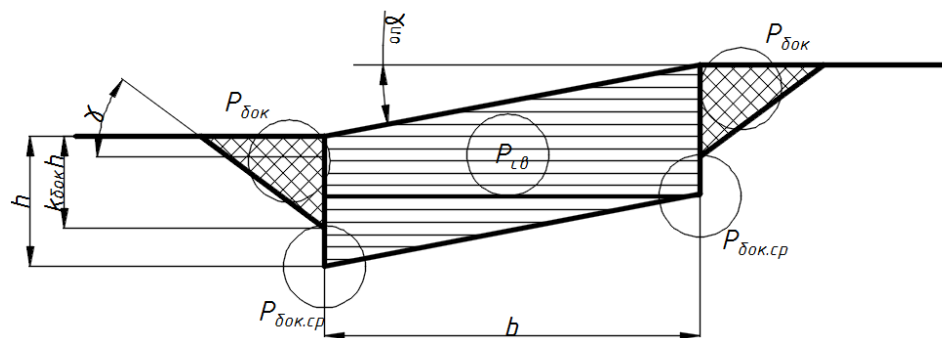


Рисунок 3.6 – Схема действия сил резания ножевым ИО с наклонной формой режущей кромки ножа при наклоне на угол $\gamma_{но}$

Из Рисунка 3.6, площадь среза в лоб ножа при наклонной режущей кромки ножа равна [98]:

$$S_{нак} = bh, \quad (3.2)$$

где b - высота параллелограмма или ширина среза, м; h - сторона параллелограмма или глубина резания, м.

Силы преодоления лобовых сопротивлений ножу P_{cv} будут одинаковыми как для ножа прямой формы, так и для ножа с наклоненной режущей кромкой при равных значениях b и h .

Следовательно, касательная составляющая силы резания не зависит от формы режущей кромки ножа.

Нормальная сила резания (Рисунок 3.7) для одного прямого острого ножа определяется по касательной силе резания, углам резания и трения (1.16) [83-85].

Разделим касательную силу резания на две составляющие, одна из которых зависит от ширины среза (ножа), а другая нет. На основании выражения (1.15), получим

$$P_{cv} = \varphi m_{cv} hb; \quad (3.3)$$

$$P_{бок.общ.} = 2h(m_{бок}h + m_{бок.ср}). \quad (3.4)$$

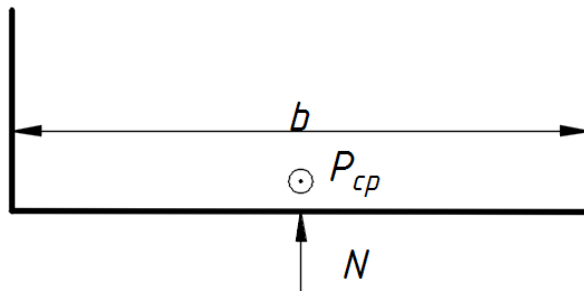


Рисунок 3.7 – Схема для определения нормальной силы резания для одного прямого ножа [83-87]

Для обеих составляющих нормальная сила резания примет вид:

$$N_{cv} = ctg(\delta + \varphi_{TP})P_{cv}; \quad (3.5)$$

$$N_{бок.общ.} = ctg(\delta + \varphi_{TP})P_{бок.общ.}. \quad (3.6)$$

Нормальная сила резания (Рисунок 3.8) для одного ножа с наклонной режущей кромкой ножа на угол γ_{uo} :

$$N = N_{р.кромки} \cos(\gamma_{uo}), \quad (3.7)$$

где $N_{р.кромки}$ - нормальная сила резания, приходящая перпендикулярно к режущей кромки ножа, Н.

С учетом выражения (3.7) и Рисунка 3.8, выражения (3.5) и (3.6) примут вид:

$$N_{св} = ctg(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_{uo}) P_{св}; \quad (3.8)$$

$$N_{бок.общ.} = ctg(\delta + \varphi_{TP}) P_{бок.общ.}. \quad (3.9)$$

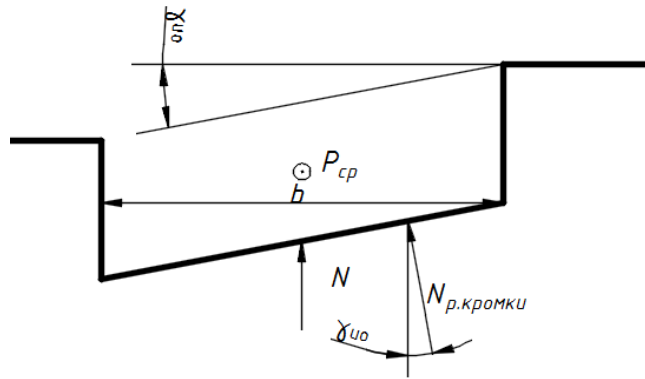


Рисунок 3.8 – Схема для определения нормальной силы резания для одного ножа с наклонной формой режущей кромки ножа

Нормальная силы резания для одного ножа с выпуклой формой режущей кромки (Рисунок 3.9) с учетом выражений (3.8) и (3.9) определяется по выражениям [99]:

$$N_{св} = ctg(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_b) P_{св}; \quad (3.10)$$

$$N_{бок.общ.} = ctg(\delta + \varphi_{TP}) P_{бок.общ.}. \quad (3.11)$$

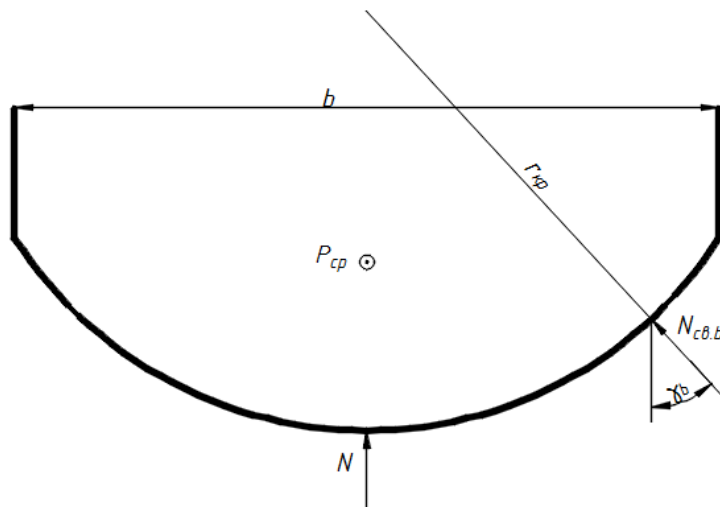


Рисунок 3.9 – Схема для определения нормальной силы резания для ножа с выпуклой формой режущей кромки ножа

Составляющая нормальную силу резания, зависящая от ширины среза, для элементарного участка ножа ИО (db) определяется выражением:

$$dN_{св} = N_{св.b} \cos(\gamma_b) db, \quad (3.12)$$

где $N_{св.b}$ - нормальная сила резания, приходящая перпендикулярно к режущей кромки ножа на участке db , Н; γ_b - угол наклона участка db режущей кромки, град.

С учетом выражения (3.5) и (3.3), выражение (3.12) примет вид:

$$dN_{св} = ctg(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_b) \varphi m_{св} h db. \quad (3.13)$$

Проинтегрировав выражение по db , получим:

$$N_{св} = \int ctg(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_b) \varphi m_{св} h db. \quad (3.14)$$

Для нахождения интеграла, построим схему для определения нормальной силы резания для ножа с выпуклой формой режущей кромки в системе координат, где начало координат расположено в центре окружности с радиусом $r_{кр}$ (Рисунок 3.10).

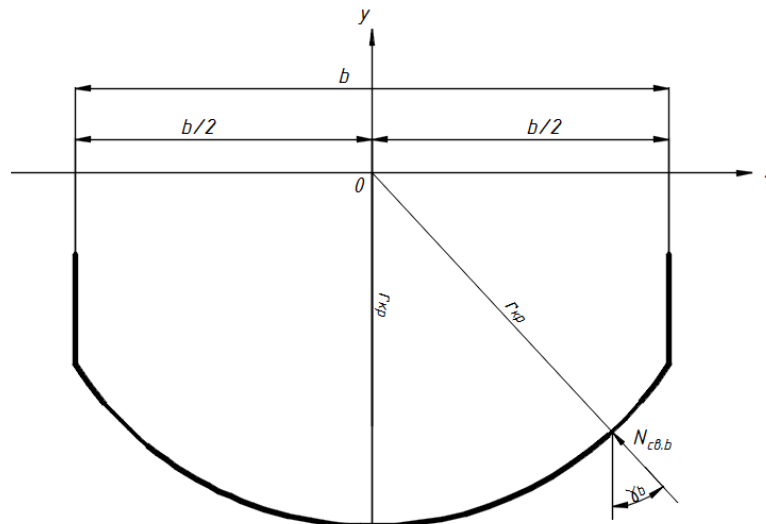


Рисунок 3.10 – Схема для определения нормальной силы резания для ножа с выпуклой формой режущей кромки ножа, представленная в системе координат

Из Рисунка 3.10 будем иметь:

$$r_{кр}^2 = x^2 + y^2; \quad (3.15)$$

$$y = \sqrt{r_{kp}^2 - x^2}; \quad (3.16)$$

$$\cos(\gamma_b) = \frac{y}{r_{kp}}. \quad (3.17)$$

Подставим выражения (3.15), (3.16), (3.17) в выражение (3.14). С учетом, что $db=dx$ получим:

$$N_{cв} = \int_{-b/2}^{b/2} \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \frac{\sqrt{r_{kp}^2 - x^2}}{r_{kp}} \varphi m_{cв} h dx. \quad (3.18)$$

Вынесем постоянные величины из под интеграла:

$$N_{cв} = \frac{\varphi m_{cв} h \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP})}{r_{kp}} \int_{-b/2}^{b/2} \sqrt{r_{kp}^2 - x^2} dx. \quad (3.19)$$

Решим отдельно интеграл:

$$\begin{aligned} \int_{-b/2}^{b/2} \sqrt{r_{kp}^2 - x^2} dx &= \left| \begin{array}{l} x = r_{kp} \sin t \\ dx = r_{kp} \cos t dt \\ t = \arcsin\left(\frac{x}{r_{kp}}\right) \end{array} \right| = \int_{-b/2}^{b/2} \sqrt{r_{kp}^2 - (r_{kp} \sin t)^2} r_{kp} \cos t dt = \\ &= r_{kp}^2 \int_{-b/2}^{b/2} \sqrt{1 - \sin^2 t} \cos t dt = r_{kp}^2 \int_{-b/2}^{b/2} \cos^2 t dt = r_{kp}^2 \int_{-b/2}^{b/2} \frac{1 + \cos 2t}{2} dt = \frac{r_{kp}^2}{2} \left(t + \frac{1}{2} \sin 2t \right) \Big|_{-b/2}^{b/2} = \\ &= \frac{r_{kp}^2}{2} \left(t + \frac{1}{2} 2 \sin t \cos t \right) \Big|_{-b/2}^{b/2} = \frac{r_{kp}^2}{2} \left(\arcsin\left(\frac{x}{r_{kp}}\right) + \sin\left(\arcsin\left(\frac{x}{r_{kp}}\right)\right) \cos\left(\arcsin\left(\frac{x}{r_{kp}}\right)\right) \right) \Big|_{-b/2}^{b/2} = \\ &= \frac{r_{kp}^2}{2} \left(\arcsin\left(\frac{x}{r_{kp}}\right) + \left(\frac{x}{r_{kp}}\right) \frac{\sqrt{r_{kp}^2 - x^2}}{r_{kp}} \right) \Big|_{-b/2}^{b/2} = \frac{r_{kp}^2}{2} \arcsin\left(\frac{x}{r_{kp}}\right) + \frac{x \sqrt{r_{kp}^2 - x^2}}{2} \Big|_{-b/2}^{b/2} = \\ &= \frac{r_{kp}^2}{2} \arcsin\left(\frac{b}{2r_{kp}}\right) + \frac{b \sqrt{r_{kp}^2 - \frac{b^2}{4}}}{4} - \left(\frac{r_{kp}^2}{2} \arcsin\left(-\frac{b}{2r_{kp}}\right) + \frac{-b \sqrt{r_{kp}^2 - \frac{b^2}{4}}}{4} \right) = \end{aligned}$$

$$= r_{кр}^2 \arcsin\left(\frac{b}{2r_{кр}}\right) + \frac{b\sqrt{r_{кр}^2 - \frac{b^2}{4}}}{2}. \quad (3.20)$$

После подстановки выражение (3.17) примет вид:

$$N_{св} = \frac{\varphi m_{св} h \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP})}{r_{кр}} \left(r_{кр}^2 \arcsin\left(\frac{b}{2r_{кр}}\right) + \frac{b\sqrt{r_{кр}^2 - \frac{b^2}{4}}}{2} \right). \quad (3.21)$$

Упростим выражение:

$$N_{св} = \varphi m_{св} h \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \left(r_{кр} \arcsin\left(\frac{b}{2r_{кр}}\right) + \frac{b\sqrt{r_{кр}^2 - \frac{b^2}{4}}}{2r_{кр}} \right). \quad (3.22)$$

Таким образом, выражение (3.22) позволяет определять значение нормальной силы блокированного резания, зависящей от ширины среза, в зависимости от параметров геосреды, геометрических параметров ножа: угол резания δ , ширина среза b и радиус кривизны $r_{кр}$ режущей кромки ножа выпуклой формы.

Режущая кромка полувыпуклой формы является частным случаем выпуклой формы, и как видно из Рисунка 3.11 выражение (3.18) будет отличаться только пределами интегрирования от 0 до b .

С учетом пределов интегрирования от 0 до b выражение (3.18) примет вид:

$$N_{св} = \int_0^b \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \frac{\sqrt{r_{кр}^2 - x^2}}{r_{кр}} \varphi m_{св} h dx. \quad (3.23)$$

Вынесем постоянные величины из под интеграла:

$$N_{св} = \frac{\varphi m_{св} h \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP})}{r_{кр}} \int_0^b \sqrt{r_{кр}^2 - x^2} dx. \quad (3.24)$$

Решим отдельно интеграл:

$$\begin{aligned}
\int_0^b \sqrt{r_{kp}^2 - x^2} dx &= \left| \begin{array}{l} x = r_{kp} \sin t \\ dx = r_{kp} \cos t dt \\ t = \arcsin\left(\frac{x}{r_{kp}}\right) \end{array} \right| = \int_0^b \sqrt{r_{kp}^2 - (r_{kp} \sin t)^2} r_{kp} \cos t dt = \\
&= r_{kp}^2 \int_0^b \sqrt{1 - \sin^2 t} \cos t dt = r_{kp}^2 \int_0^b \cos^2 t dt = r_{kp}^2 \int_0^b \frac{1 + \cos 2t}{2} dt = \frac{r_{kp}^2}{2} \left(t + \frac{1}{2} \sin 2t \right) \Big|_0^b = \\
&= \frac{r_{kp}^2}{2} \left(t + \frac{1}{2} 2 \sin t \cos t \right) \Big|_0^b = \frac{r_{kp}^2}{2} \left(\arcsin\left(\frac{x}{r_{kp}}\right) + \sin\left(\arcsin\left(\frac{x}{r_{kp}}\right)\right) \right) \times \\
&\times \cos\left(\arcsin\left(\frac{x}{r_{kp}}\right)\right) \Big|_0^b = \frac{r_{kp}^2}{2} \left(\arcsin\left(\frac{x}{r_{kp}}\right) + \left(\frac{x}{r_{kp}}\right) \frac{\sqrt{r_{kp}^2 - x^2}}{r_{kp}} \right) \Big|_0^b = \\
&= \frac{r_{kp}^2}{2} \arcsin\left(\frac{x}{r_{kp}}\right) + \frac{x \sqrt{r_{kp}^2 - x^2}}{2} \Big|_0^b = \frac{r_{kp}^2}{2} \arcsin\left(\frac{b}{r_{kp}}\right) + \frac{b \sqrt{r_{kp}^2 - b^2}}{2}. \quad (3.25)
\end{aligned}$$

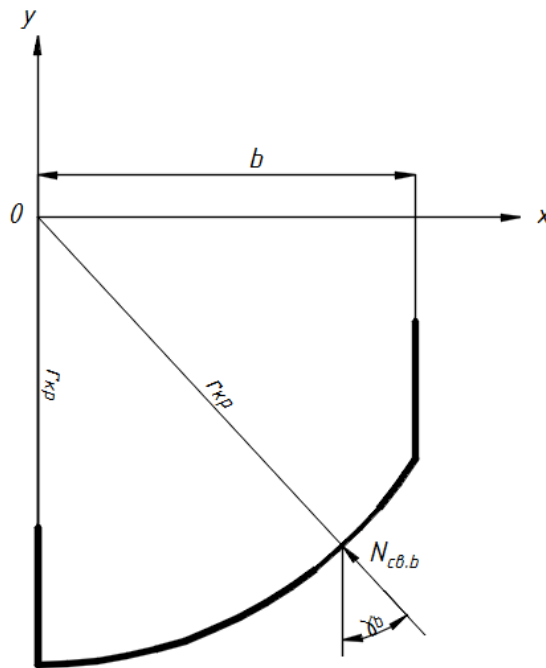


Рисунок 3.11 – Схема для определения нормальной силы резания для одного ножа с полувыпуклой формой режущей кромки ножа, представленная в системе координат

После подстановки выражение (3.17) примет вид:

$$N_{cv} = \frac{\varphi m_{cv} h \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP})}{r_{кр}} \left(\frac{r_{кр}^2}{2} \arcsin\left(\frac{b}{r_{кр}}\right) + \frac{b\sqrt{r_{кр}^2 - b^2}}{2} \right). \quad (3.26)$$

Упростим выражение:

$$N_{cv} = \varphi m_{cv} h \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \left(\frac{r_{кр}}{2} \arcsin\left(\frac{b}{r_{кр}}\right) + \frac{b\sqrt{r_{кр}^2 - b^2}}{2r_{кр}} \right). \quad (3.27)$$

Выражение (3.27) позволяет определять значение нормальной силы блокированного резания, зависящей от ширины среза, в зависимости от параметров геосреды, геометрических параметров ножа: угол резания δ , ширина среза b и радиус кривизны $r_{кр}$ режущей кромки ножа полувыпуклой формы.

Форма режущей кромки ножа не влияет на силу резания, независимую от ширины среза [96-99].

Полученные выражения (3.9), (3.22) и (3.27) позволяют определять значение нормальной силы блокированного резания в зависимости от параметров геосреды, геометрических параметров ножа: угол резания δ , ширина среза b и радиус кривизны $r_{кр}$ режущей кромки ножа полувыпуклой и выпуклой формы.

3.3 Определение суммарных усилий резания ножевым исполнительным органом геохода

Определению силовых параметров взаимодействия ножевых ИО геохода с породой забоя, были посвящены работы Аксенова В.В. и Садовца В.Ю. [11, 18, 51]. В работах рассматривались ножевые ИО с прямой и наклонной формой режущей кромки ножа.

За основу взята методика определения сил резания по опытным коэффициентам, разработанная Ветровым Ю.А. При разработке данных методик авторами

не было учтено влияние угла перемещения точки ножа ИО геохода на забой выработки на толщину среза [100-103].

Из п. 3.2 на силу резания, независящую от ширины среза не влияет форма режущей кромки ножа, следовательно проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, независящей от ширины среза, на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей не зависят от формы режущей кромки.

Подставив в формулы (1.17), (1.18) и (1.19) выражения (1.3), (3.4) и (3.6) и после некоторых преобразований получим:

$$P_{o.бок} = \frac{h_B}{n} \sum_{i=1}^2 \left(m_{бок} \frac{h_B}{n} \cos \beta_i + m_{бок.ср} \right) \left(\frac{\sin 2\beta_i}{2} - ctg(\delta + \varphi_{mp}) \cos^2 \beta_i \right); \quad (3.28)$$

$$R_{u.o.бок} = \frac{h_B}{n} \sum_{i=2}^2 \left(m_{бок} \frac{h_B}{n} \cos \beta_i + m_{бок.ср} \right) \left(\cos^2 \beta_i + ctg(\delta + \varphi_{mp}) \frac{\sin 2\beta_i}{2} \right); \quad (3.29)$$

$$M_{u.o.бок} = \frac{h_B r_z}{n} \left(m_{бок} \frac{h_B}{n} \cos \beta_1 + m_{бок.ср} \right) \left(\cos^2 \beta_1 + ctg(\delta + \varphi_{mp}) \frac{\sin 2\beta_1}{2} \right) + \\ + \frac{h_B r_o}{n} \left(m_{бок} \frac{h_B}{n} \cos \beta_2 + m_{бок.ср} \right) \left(\cos^2 \beta_2 + ctg(\delta + \varphi_{mp}) \frac{\sin 2\beta_2}{2} \right). \quad (3.30)$$

Полученные выражения (3.28), (3.29) и (3.30) позволяют определять проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, независящей от ширины среза, на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_z – радиуса головной секции геохода, r_o – радиуса образующей, h_g – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геохода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_z , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_o .

Составляющая нормальной силы резания, зависящая от ширины среза зависит от формы режущей кромки ножа, следовательно, проекции составляющей силы сопротивления резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения

геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей зависят от формы режущей кромки ножа.

3.3.1 Установление зависимости усилия резания от ширины среза на ножевом исполнительном органе геохода с прямой формой режущей кромки ножа

Подставив в формулы (1.17), (1.18) и (1.19) выражения (3.3) и (3.5) с учетом (1.2) и (1.3) и затем, проинтегрировав по db , получим:

$$P_{o.c\delta} = \int_{r_0}^{r_2} \sin\left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b}\right) \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} db - \int_{r_0}^{r_2} \cos^2\left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b}\right) \times \\ \times \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} db; \quad (3.31)$$

$$R_{u.o.c\delta} = \int_{r_0}^{r_2} \cos^2\left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b}\right) \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} db + \int_{r_0}^{r_2} \sin\left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b}\right) \times \\ \times \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} db; \quad (3.32)$$

$$M_{u.o.c\delta} = \int_{r_0}^{r_2} b \cos^2\left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b}\right) \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} db + \int_{r_0}^{r_2} b \sin\left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b}\right) \times \\ \times \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} db. \quad (3.33)$$

Вынесем постоянные величины из под интеграла:

$$P_{o.c\delta} = \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} \int_{r_0}^{r_2} \sin\left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b}\right) db - \\ - \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} \int_{r_0}^{r_2} \cos^2\left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b}\right) db; \quad (3.34)$$

$$R_{u.o.c\delta} = \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} \int_{r_0}^{r_z} \cos^2 \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) db +$$

$$+ ctg(\delta + \varphi_{TP}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} \int_{r_0}^{r_z} \sin \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \cos \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) db; \quad (3.35)$$

$$M_{u.o.c\delta} = \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} \int_{r_0}^{r_z} b \cos^2 \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) db +$$

$$+ ctg(\delta + \varphi_{TP}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} \int_{r_0}^{r_z} b \sin \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \cos \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) db. \quad (3.36)$$

Формулы (3.34), (3.35) и (3.36) содержат четыре вида интегралов.

- 1) $\int_{r_0}^{r_z} \sin \left(\arctg \left(\frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \right) \cos \left(\arctg \left(\frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \right) db;$
- 2) $\int_{r_0}^{r_z} \cos^2 \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) db;$
- 3) $\int_{r_0}^{r_z} b \cos^2 \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) db;$
- 4) $\int_{r_0}^{r_z} b \sin \left(\arctg \left(\frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \right) \cos \left(\arctg \left(\frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \right) db.$

Введем обозначение постоянных значений находящихся под знаком интеграла $\frac{h_{\delta}}{2\pi} = A$.

$\arctg \left(\frac{A}{b} \right) = t$, отсюда $b = \frac{A}{tgt}$ после дифференцирования по $\frac{db}{dt}$ будем иметь

$$db = -\frac{A}{tg^2 t} \cdot \frac{1}{\cos^2 t} dt = -\frac{A}{\sin^2 t} dt.$$

Решение первого вида интеграла. После подстановки будем иметь:

$$\int_{r_0}^{r_z} \sin \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \cos \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) db = -A \int_{r_0}^{r_z} \sin t \frac{1}{\sin^2 t} \cos(t) dt =$$

$$= -A \int_{r_0}^{r_z} \frac{\cos t}{\sin t} dt = -A \cdot \ln |\sin t| \Big|_{r_0}^{r_z} = -A \cdot \ln \left| \sin \left(\arctg \left(\frac{A}{b} \right) \right) \right| \Big|_{r_0}^{r_z}$$

поскольку $\operatorname{arctg}\left(\frac{A}{r_o}\right) = \beta_2$ а $\operatorname{arctg}\left(\frac{A}{r_z}\right) = \beta_1$ то решение первого вида интеграла будет иметь вид:

$$-A \cdot \ln \left| \sin \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{A}{b} \right) \right) \right| \Big|_{r_o}^{r_z} = -A \cdot (\ln |\sin \beta_1| - \ln |\sin \beta_2|) = A \cdot \left(\ln \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) \right). \quad (3.37)$$

Решение интеграла второго вида. После подстановки будем иметь:

$$\begin{aligned} \int_{r_o}^{r_z} \cos^2 \left(\operatorname{arctg} \frac{h_g}{2\pi b} \right) db &= -A \int_{r_o}^{r_z} \cos^2 t \frac{1}{\sin^2(t)} dt = -A \int_{r_o}^{r_z} \frac{\cos^2 t}{\sin^2 t} dt = -A \int_{r_o}^{r_z} \operatorname{ctg}^2 t dt = -A \cdot (-\operatorname{ctg} t - t) \Big|_{r_o}^{r_z} = \\ &= -A \cdot \left(-\operatorname{ctg} \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{A}{b} \right) \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{A}{b} \right) \right) \Big|_{r_o}^{r_z} = A \cdot \left(\frac{b}{A} + \operatorname{arctg} \left(\frac{A}{b} \right) \right) \Big|_{r_o}^{r_z} \end{aligned}$$

поскольку $\operatorname{arctg}\left(\frac{A}{r_o}\right) = \beta_2$ а $\operatorname{arctg}\left(\frac{A}{r_z}\right) = \beta_1$ то решение второго вида интеграла будет иметь вид:

$$A \cdot \left(\frac{b}{A} + \operatorname{arctg} \left(\frac{A}{b} \right) \right) \Big|_{r_o}^{r_z} = A \left(\frac{r_z}{A} + \beta_1 - \frac{r_o}{A} - \beta_2 \right) = r_z - r_o + A(\beta_1 - \beta_2). \quad (3.38)$$

Решение интеграла третьего вида. После подстановки будем иметь:

$$\begin{aligned} \int_{r_o}^{r_z} b \cos^2 \left(\operatorname{arctg} \frac{h_g}{2\pi b} \right) db &= - \int_{r_o}^{r_z} \frac{A}{\operatorname{tg} t} \cos^2 t \frac{A}{\sin^2 t} dt = -A^2 \int_{r_o}^{r_z} \frac{\cos^3 t}{\sin^3 t} dt = \\ &= -A^2 \int_{r_o}^{r_z} \operatorname{ctg}^3 t dt = -A^2 \left(-\frac{1}{2 \sin^2 t} - \ln(\sin t) \right) \Big|_{r_o}^{r_z} = A^2 \left(\frac{1}{2 \sin^2 t} + \ln(\sin t) \right) \Big|_{r_o}^{r_z} = \\ &= A^2 \left(\frac{1}{2 \sin^2 \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{A}{b} \right) \right)} + \ln \left(\sin \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{A}{b} \right) \right) \right) \right) \Big|_{r_o}^{r_z} \end{aligned}$$

поскольку, $\operatorname{arctg}\left(\frac{A}{r_o}\right) = \beta_2$ а $\operatorname{arctg}\left(\frac{A}{r_z}\right) = \beta_1$ то решение третьего вида интеграла будет иметь вид:

$$A^2 \left(\frac{1}{2 \sin^2 \left(\arctg \left(\frac{A}{b} \right) \right)} + \ln \left(\sin \left(\arctg \left(\frac{A}{b} \right) \right) \right) \right) \Bigg|_{r_o}^{r_z} = A^2 \left(\frac{1}{2 \sin^2 \beta_1} + \ln(\sin \beta_1) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2 \sin^2 \beta_2} - \ln(\sin \beta_2) \right) = A^2 \left(\frac{\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1}{2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_2} + \ln \left(\frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \right) \right). \quad (3.39)$$

Решение интеграла четвертого вида. После подстановки будем иметь:

$$\int_{r_o}^{r_z} b \sin \left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b} \right) \cos \left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b} \right) dx = - \int_{r_o}^{r_z} \frac{A}{tgt} \sin t \cos t \frac{A}{\sin^2 t} dt = \\ = -A^2 \int_{r_o}^{r_z} \frac{\cos t \sin t \cos t}{\sin^2 t \sin t} dt = -A^2 \int_{r_o}^{r_z} \frac{\cos^2 t}{\sin^2 t} dt = -A^2 \int_{r_o}^{r_z} ctg^2 t dt = -A^2 \cdot (-ctgt - t) \Big|_{r_o}^{r_z} = \\ = -A^2 \cdot \left(-ctg \left(\arctg \left(\frac{A}{b} \right) \right) - \arctg \left(\frac{A}{b} \right) \right) \Big|_{r_o}^{r_z} = A^2 \cdot \left(\frac{b}{A} + \arctg \left(\frac{A}{b} \right) \right) \Big|_{r_o}^{r_z}$$

поскольку, $\arctg \left(\frac{A}{r_o} \right) = \beta_2$ а $\arctg \left(\frac{A}{r_z} \right) = \beta_1$ то решение третьего вида интеграла

будет иметь вид:

$$A^2 \cdot \left(\frac{b}{A} + \arctg \left(\frac{A}{b} \right) \right) \Big|_{r_o}^{r_z} = A^2 \left(\frac{r_z}{A} + \beta_1 - \frac{r_o}{A} - \beta_2 \right) = A(r_z - r_o) + A^2(\beta_1 - \beta_2). \quad (3.40)$$

После подстановки решенных интегралов в выражения (3.34), (3.35), (3.36) окончательно будем иметь:

$$P_{o.cs} = \varphi m_{cs} \frac{h_g}{n} \left(\frac{h_g}{2\pi} \ln \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) - ctg(\delta + \varphi_{TP}) \left(r_z - r_o + \frac{h_g}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) \right); \quad (3.41)$$

$$R_{u.o.cs} = \varphi m_{cs} \frac{h_g}{n} \left(\left(r_z - r_o + \frac{h_g}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) + ctg(\delta + \varphi_{TP}) \frac{h_g}{2\pi} \ln \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) \right); \quad (3.42)$$

$$M_{u.o.cs} = \varphi m_{cs} \frac{h_g^2}{2\pi n} \left(\frac{h_g}{2\pi} \left(\frac{\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1}{2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_2} + \ln \left(\frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \right) \right) + \right.$$

$$+ \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \left((r_z - r_o) + \frac{h_g}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right). \quad (3.43)$$

Выражения (3.41), (3.42) и (3.43) позволяют определять проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей, для ножевого ИО геохода с прямой формой режущей кромки ножа в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_z – радиуса головной секции геохода, r_o – радиуса образующей, h_g – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геохода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_z , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_o .

Полученные зависимости отличаются от выражений представленных в работах В.В. Аксенова и В.Ю. Садовца [11, 18, 51].

3.3.2 Установление зависимости усилия резания от ширины среза на ножевом исполнительном органе геохода с наклонной формой режущей кромки ножа

Подставив в формулы (1.17), (1.18) и (1.19) выражения (3.3) и (3.8) с учетом (1.2) и (1.3) и затем, проинтегрировав по db , получим:

$$P_{o.c\theta} = \int_{r_0}^{r_z} \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{h_g}{2\pi b}\right) \cos\left(\operatorname{arctg} \frac{h_g}{2\pi b}\right) \varphi m_{c\theta} \frac{h_g}{n} db - \int_{r_0}^{r_z} \cos^2\left(\operatorname{arctg} \frac{h_g}{2\pi b}\right) \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \times \\ \times \cos(\gamma_{uo}) \varphi m_{c\theta} \frac{h_g}{n} db; \quad (3.44)$$

$$R_{u.o.c\theta} = \int_{r_0}^{r_z} \cos^2\left(\operatorname{arctg} \frac{h_g}{2\pi b}\right) \varphi m_{c\theta} \frac{h_g}{n} db + \int_{r_0}^{r_z} \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{h_g}{2\pi b}\right) \cos\left(\operatorname{arctg} \frac{h_g}{2\pi b}\right) \times \\ \times \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_{uo}) \varphi m_{c\theta} \frac{h_g}{n} db; \quad (3.45)$$

$$M_{u.o.c\delta} = \int_{r_0}^{r_z} b \cos^2 \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} db + \int_{r_0}^{r_z} b \sin \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) \cos \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) \times \\ \times \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_{uo}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} db. \quad (3.46)$$

Вынесем постоянные величины из-под интеграла:

$$P_{o.c\delta} = \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} \int_{r_0}^{r_z} \sin \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) \cos \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) db - \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_{uo}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} \times \\ \times \int_{r_0}^{r_z} \cos^2 \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) db; \quad (3.47)$$

$$R_{u.o.c\delta} = \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} \int_{r_0}^{r_z} \cos^2 \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) db + \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_{uo}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} \times \\ \times \int_{r_0}^{r_z} \sin \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) \cos \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) db; \quad (3.48)$$

$$M_{u.o.c\delta} = \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} \int_{r_0}^{r_z} b \cos^2 \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) db + \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_{uo}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} \times \\ \times \int_{r_0}^{r_z} b \sin \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) \cos \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) db. \quad (3.49)$$

Формулы (3.47), (3.48) и (3.49) содержат четыре вида интегралов.

$$1) \int_{r_0}^{r_z} \sin \left(\arctg \left(\frac{h_\delta}{2\pi b} \right) \right) \cos \left(\arctg \left(\frac{h_\delta}{2\pi b} \right) \right) db;$$

$$2) \int_{r_0}^{r_z} \cos^2 \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) db;$$

$$3) \int_{r_0}^{r_z} b \cos^2 \left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b} \right) db;$$

$$4) \int_{r_o}^{r_z} b \sin\left(\arctg\left(\frac{h_e}{2\pi b}\right)\right) \cos\left(\arctg\left(\frac{h_e}{2\pi b}\right)\right) db.$$

Полученные интегралы аналогичные интегралам с выражений (3.34), (3.35), (3.36). То после подстановки решенных интегралов в выражения (3.47), (3.48), (3.49) окончательно будем иметь:

$$P_{o.c\delta} = \varphi m_{c\delta} \frac{h_e}{n} \left(\frac{h_e}{2\pi} \ln\left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1}\right) - ctg(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_{uo}) \left(r_z - r_o + \frac{h_e}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) \right); \quad (3.50)$$

$$R_{u.o.c\delta} = \varphi m_{c\delta} \frac{h_e}{n} \left(\left(r_z - r_o + \frac{h_e}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) + ctg(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_{uo}) \frac{h_e}{2\pi} \ln\left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1}\right) \right); \quad (3.51)$$

$$M_{u.o.c\delta} = \varphi m_{c\delta} \frac{h_e^2}{2\pi n} \left(\frac{h_e}{2\pi} \left(\frac{\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1}{2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_2} + \ln\left(\frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2}\right) \right) + \right. \\ \left. + ctg(\delta + \varphi_{TP}) \cos(\gamma_{uo}) \left((r_z - r_o) + \frac{h_e}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) \right). \quad (3.52)$$

Выражения (3.50), (3.51) и (3.52) позволяют определять проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей, для ножевого ИО геохода с наклонной формой режущей кромки ножа в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_z – радиуса головной секции геохода, r_o – радиуса образующей, h_e – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геохода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_z , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_o , γ_{uo} – угла наклона ножа.

Полученные зависимости отличаются от выражений представленных в работах В.В. Аксенова и В.Ю. Садовца [11, 18, 51].

3.3.3 Установление зависимости усилия резания от ширины среза на ножевом исполнительном органе геохода с полувывуклой формой режущей кромки ножа

Подставив в формулы (1.17), (1.18) и (1.19) выражения (3.3), (3.13), (3.15), (3.16) и (3.17) с учетом (1.2) и (1.3) и затем, проинтегрировав по db , получим:

$$P_{o.c\delta} = \int_{r_0}^{r_2} \sin\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} db - \int_{r_0}^{r_2} \cos^2\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \times \\ \times \frac{\sqrt{r_{kp}^2 - b^2} \varphi m_{c\delta} h_\delta}{r_{kp} n} db; \quad (3.53)$$

$$R_{u.o.c\delta} = \int_{r_0}^{r_2} \cos^2\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} db + \int_{r_0}^{r_2} \sin\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \times \\ \times \frac{\sqrt{r_{kp}^2 - b^2} \varphi m_{c\delta} h_\delta}{r_{kp} n} db; \quad (3.54)$$

$$M_{u.o.c\delta} = \int_{r_0}^{r_2} b \cos^2\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} db + \int_{r_0}^{r_2} b \sin\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \times \\ \times \frac{\sqrt{r_{kp}^2 - b^2} \varphi m_{c\delta} h_\delta}{r_{kp} n} db; \quad (3.55)$$

Вынесем постоянные величины из под интеграла

$$P_{o.c\delta} = \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} \int_{r_0}^{r_2} \sin\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) db - \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{r_{kp} n} \times \\ \times \int_{r_0}^{r_2} \cos^2\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db; \quad (3.56)$$

$$R_{u.o.c\delta} = \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{n} \int_{r_0}^{r_2} \cos^2\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) db + \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_\delta}{r_{kp} n} \times \\ \times \int_{r_0}^{r_2} \sin\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_\delta}{2\pi b}\right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db; \quad (3.57)$$

$$M_{u.o.c\delta} = \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{n} \int_{r_0}^{r_z} b \cos^2 \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) db + ctg(\delta + \varphi_{TP}) \varphi m_{c\delta} \frac{h_{\delta}}{r_{kp} n} \times \\ \times \int_{r_0}^{r_z} b \sin \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \cos \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db. \quad (3.58)$$

Формулы (3.56), (3.57) и (3.58) содержат шесть видов интегралов.

- 1) $\int_{r_0}^{r_z} \sin \left(\arctg \left(\frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \right) \cos \left(\arctg \left(\frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \right) db;$
- 2) $\int_{r_0}^{r_z} \cos^2 \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db;$
- 3) $\int_{r_0}^{r_z} \cos^2 \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) db;$
- 4) $\int_{r_0}^{r_z} \sin \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \cos \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db;$
- 5) $\int_{r_0}^{r_z} b \cos^2 \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) db;$
- 6) $\int_{r_0}^{r_z} b \sin \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \cos \left(\arctg \frac{h_{\delta}}{2\pi b} \right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db.$

Интегралы 1, 3 и 5 вида аналогичные интегралам с выражений (3.34), (3.35), (3.36).

Введем обозначение постоянных значений находящихся под знаком интеграла $\frac{h_{\delta}}{2\pi} = A$.

$$\text{Также } \sin \left(\arctg \left(\frac{A}{b} \right) \right) = \frac{\frac{A}{b}}{\sqrt{1 + \left(\frac{A}{b} \right)^2}} \text{ и } \cos \left(\arctg \left(\frac{A}{b} \right) \right) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{A}{b} \right)^2}}.$$

Решение второго вида интеграла. После подстановки будем иметь:

$$\begin{aligned}
& \int_{r_0}^{r_z} \cos^2 \left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b} \right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db = \int_{r_0}^{r_z} \frac{1}{1 + \left(\frac{A}{b} \right)^2} \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db = \int_{r_0}^{r_z} \frac{b^2 \sqrt{r_{kp}^2 - b^2}}{b^2 + A^2} db = \\
& = \frac{b}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2 \right) \arcsin \left(\frac{b}{r_{kp}} \right) - A r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}} \right)^2} \arctg \left(\frac{b \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{A \sqrt{r_{kp}^2 - b^2}} \right) \Bigg|_{r_0}^{r_z} = \\
& = \frac{r_z}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2 \right) \arcsin \left(\frac{r_z}{r_{kp}} \right) - A r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}} \right)^2} \arctg \left(\frac{r_z \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{A \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2}} \right) - \\
& - \left(\frac{r_0}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2 \right) \arcsin \left(\frac{r_0}{r_{kp}} \right) - A r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}} \right)^2} \arctg \left(\frac{r_0 \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{A \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2}} \right) \right) = \\
& = \frac{r_z}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2} - \frac{r_0}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2 \right) \left(\arcsin \left(\frac{r_z}{r_{kp}} \right) - \arcsin \left(\frac{r_0}{r_{kp}} \right) \right) - \\
& - A r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}} \right)^2} \left(\arctg \left(\frac{r_z \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{A \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2}} \right) - \arctg \left(\frac{r_0 \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{A \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2}} \right) \right). \quad (3.59)
\end{aligned}$$

Решение интеграла четвертого вида. После подстановки будем иметь:

$$\begin{aligned}
& \int_{r_0}^{r_z} \sin \left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b} \right) \cos \left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b} \right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db = \int_{r_0}^{r_z} \frac{\frac{A}{b}}{1 + \left(\frac{A}{b} \right)^2} \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db = \\
& = A \int_{r_0}^{r_z} \frac{b \sqrt{r_{kp}^2 - b^2}}{b^2 + A^2} db = A \left(\sqrt{r_{kp}^2 - b^2} - \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} \ln \left(\frac{\sqrt{r_{kp}^2 + A^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - b^2}}{\sqrt{b^2 + A^2}} \right) \right) \Bigg|_{r_0}^{r_z} = \\
& = A \left(\sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2} - \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} \ln \left(\frac{\sqrt{r_{kp}^2 + A^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2}}{\sqrt{r_z^2 + A^2}} \right) - \right. \\
& \left. - \left(\sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2} - \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} \ln \left(\frac{\sqrt{r_{kp}^2 + A^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2}}{\sqrt{r_0^2 + A^2}} \right) \right) \right) = \\
& = A \left(\sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2} - \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2} - \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} \ln \left(\frac{\left(\sqrt{r_{kp}^2 + A^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2} \right) \sqrt{r_0^2 + A^2}}{\sqrt{r_z^2 + A^2} \left(\sqrt{r_{kp}^2 + A^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2} \right)} \right) \right). \quad (3.60)
\end{aligned}$$

Решение интеграла шестого вида. После подстановки будем иметь:

$$\begin{aligned}
 \int_{r_0}^{r_z} b \sin\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db &= \int_{r_0}^{r_z} \frac{b \frac{A}{b}}{1 + \left(\frac{A}{b}\right)^2} \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db = A \int_{r_0}^{r_z} \frac{b^2 \sqrt{r_{kp}^2 - b^2}}{b^2 + A^2} db = \\
 &= A \left[\frac{b}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2 \right) \arcsin\left(\frac{b}{r_{kp}}\right) - A r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}}\right)^2} \arctg\left(\frac{b \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{A \sqrt{r_{kp}^2 - b^2}}\right) \right]_{r_0}^{r_z} = \\
 &= A \left[\frac{r_z}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2 \right) \arcsin\left(\frac{r_z}{r_{kp}}\right) - A r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}}\right)^2} \arctg\left(\frac{r_z \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{A \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2}}\right) - \right. \\
 &\quad \left. - \left(\frac{r_0}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2 \right) \arcsin\left(\frac{r_0}{r_{kp}}\right) - A r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}}\right)^2} \arctg\left(\frac{r_0 \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{A \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2}}\right) \right) \right] = \\
 &= A \left[\frac{r_z}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2} - \frac{r_0}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2 \right) \left(\arcsin\left(\frac{r_z}{r_{kp}}\right) - \arcsin\left(\frac{r_0}{r_{kp}}\right) \right) - \right. \\
 &\quad \left. - A r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}}\right)^2} \left(\arctg\left(\frac{r_z \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{A \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2}}\right) - \arctg\left(\frac{r_0 \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{A \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2}}\right) \right) \right]. \quad (3.61)
 \end{aligned}$$

После подстановки решенных интегралов в выражения (3.56), (3.57), (3.58) окончательно будем иметь:

$$\begin{aligned}
 P_{o.c6} &= \varphi m_{c6} \frac{h_6}{n} \left(\frac{h_6}{2\pi} \ln\left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1}\right) - \frac{ctg(\delta + \varphi_{TP})}{r_{kp}} \left(\frac{r_z}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2} - \frac{r_0}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2} + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + \frac{h_6^2}{4\pi^2} \right) \left(\arcsin\left(\frac{r_z}{r_{kp}}\right) - \arcsin\left(\frac{r_0}{r_{kp}}\right) \right) - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{h_6}{2\pi} r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{h_6}{2\pi r_{kp}}\right)^2} \left(\arctg\left(\frac{2\pi r_z \sqrt{r_{kp}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi}\right)^2}}{h_6 \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2}}\right) - \arctg\left(\frac{2\pi r_0 \sqrt{r_{kp}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi}\right)^2}}{h_6 \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2}}\right) \right) \right) \right); \quad (3.62)
 \end{aligned}$$

$$R_{u.o.cb} = \varphi m_{cb} \frac{h_g}{n} \left(\left(r_z - r_0 + \frac{h_g}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) + \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \frac{h_g}{2\pi r_{kp}} \times \right. \\ \left. \times \left(\sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2} - \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2} - \sqrt{r_{kp}^2 + \left(\frac{h_g}{2\pi} \right)^2} \ln \left(\frac{\left(\sqrt{r_{kp}^2 + \left(\frac{h_g}{2\pi} \right)^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2} \right) \sqrt{r_0^2 + \left(\frac{h_g}{2\pi} \right)^2}}{\sqrt{r_z^2 + \frac{h_g^2}{2\pi}} \left(\sqrt{r_{kp}^2 + \frac{h_g^2}{2\pi}} + \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2} \right)} \right) \right) \right); \quad (3.63)$$

$$M_{u.o.cb} = \varphi m_{cb} \frac{h_g^2}{2\pi n} \left(\frac{h_g}{2\pi} \left(\frac{\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1}{2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_2} + \ln \left(\frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \right) \right) + \frac{\operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP})}{r_{kp}} \times \right. \\ \times \left(\frac{r_z}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2} - \frac{r_0}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + \left(\frac{h_g}{2\pi} \right)^2 \right) \left(\arcsin \left(\frac{r_z}{r_{kp}} \right) - \arcsin \left(\frac{r_0}{r_{kp}} \right) \right) - \right. \\ \left. \left. - \frac{h_g}{2\pi} r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{h_g}{2\pi r_{kp}} \right)^2} \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{2\pi r_z \sqrt{r_{kp}^2 + \left(\frac{h_g}{2\pi} \right)^2}}{h_g \sqrt{r_{kp}^2 - r_z^2}} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{2\pi r_0 \sqrt{r_{kp}^2 + \left(\frac{h_g}{2\pi} \right)^2}}{h_g \sqrt{r_{kp}^2 - r_0^2}} \right) \right) \right) \right). \quad (3.64)$$

Выражения (3.62), (3.63) и (3.64) позволяют определять проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей, для ножевого ИО геохода с полувыпуклой формой режущей кромки ножа в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_z – радиуса головной секции геохода, r_0 – радиуса образующей, h_g – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геохода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_z , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_0 , r_{kp} – радиуса кривизны режущей кромки ножа.

Впервые разработаны выражения для определения усилий резания, зависящих от ширины среза, ножевого ИО геохода с полувыпуклой формой режущей кромки ножа.

3.3.4 Установление зависимости усилия резания от ширины среза на ножевом исполнительном органе геохода с выпуклой формой режущей кромки ножа

Из п. 3.2 форма режущей кромки влияет на нормальную составляющую силы резания, зависящую от ширины среза.

Режущая кромка ножа выпуклой формы является частным случаем полувывпуклой формы, для которой нормальная сила резания отличается пределами интегрирования от $\left(-\frac{r_z - r_o}{2}\right)$ до $\frac{r_z - r_o}{2}$.

Подставив в формулы (1.17), (1.18) и (1.19) выражения (3.3), (3.13), (3.15), (3.16) и (3.17) с учетом (1.2), (1.3) и пределов интегрирования и затем, проинтегрировав по db , получим:

$$P_{o.c\theta} = \int_{r_0}^{r_z} \sin\left(\arctg \frac{h_\theta}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_\theta}{2\pi b}\right) \varphi m_{c\theta} \frac{h_\theta}{n} db - \int_{-\frac{r_z - r_o}{2}}^{\frac{r_z - r_o}{2}} \cos^2\left(\arctg \frac{h_\theta}{2\pi b}\right) \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \times \\ \times \frac{\sqrt{r_{kp}^2 - b^2} \varphi m_{c\theta} h_\theta}{r_{kp} n} db; \quad (3.65)$$

$$R_{u.o.c\theta} = \int_{r_0}^{r_z} \cos^2\left(\arctg \frac{h_\theta}{2\pi b}\right) \varphi m_{c\theta} \frac{h_\theta}{n} db + \int_{-\frac{r_z - r_o}{2}}^{\frac{r_z - r_o}{2}} \sin\left(\arctg \frac{h_\theta}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_\theta}{2\pi b}\right) \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \times \\ \times \frac{\sqrt{r_{kp}^2 - b^2} \varphi m_{c\theta} h_\theta}{r_{kp} n} db; \quad (3.66)$$

$$M_{u.o.c\theta} = \int_{r_0}^{r_z} b \cos^2\left(\arctg \frac{h_\theta}{2\pi b}\right) \varphi m_{c\theta} \frac{h_\theta}{n} db + \int_{-\frac{r_z - r_o}{2}}^{\frac{r_z - r_o}{2}} b \sin\left(\arctg \frac{h_\theta}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_\theta}{2\pi b}\right) \text{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \times \\ \times \frac{\sqrt{r_{kp}^2 - b^2} \varphi m_{c\theta} h_\theta}{r_{kp} n} db; \quad (3.67)$$

Вынесем постоянные величины из под интеграла:

$$P_{o.c\theta} = \varphi m_{c\theta} \frac{h_{\theta}}{n} \int_{r_0}^{r_z} \sin\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) db - \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \varphi m_{c\theta} \frac{h_{\theta}}{r_{kp} n} \times$$

$$\times \int_{\frac{r_z - r_0}{2}}^{\frac{r_z - r_0}{2}} \cos^2\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db ; \quad (3.68)$$

$$R_{u.o.c\theta} = \varphi m_{c\theta} \frac{h_{\theta}}{n} \int_{r_0}^{r_z} \cos^2\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) db + \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \varphi m_{c\theta} \frac{h_{\theta}}{r_{kp} n} \times$$

$$\times \int_{\frac{r_z - r_0}{2}}^{\frac{r_z - r_0}{2}} \sin\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db ; \quad (3.69)$$

$$M_{u.o.c\theta} = \varphi m_{c\theta} \frac{h_{\theta}}{n} \int_{r_0}^{r_z} b \cos^2\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) db + \operatorname{ctg}(\delta + \varphi_{TP}) \varphi m_{c\theta} \frac{h_{\theta}}{r_{kp} n} \times$$

$$\times \int_{\frac{r_z - r_0}{2}}^{\frac{r_z - r_0}{2}} b \sin\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db . \quad (3.70)$$

Формулы (3.68), (3.69) и (3.70) содержат шесть видов интегралов.

- 1) $\int_{r_0}^{r_z} \sin\left(\arctg\left(\frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right)\right) \cos\left(\arctg\left(\frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right)\right) db ;$
- 2) $\int_{\frac{r_z - r_0}{2}}^{\frac{r_z - r_0}{2}} \cos^2\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db ;$
- 3) $\int_{r_0}^{r_z} \cos^2\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) db ;$
- 4) $\int_{\frac{r_z - r_0}{2}}^{\frac{r_z - r_0}{2}} \sin\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db ;$
- 5) $\int_{r_0}^{r_z} b \cos^2\left(\arctg \frac{h_{\theta}}{2\pi b}\right) db ;$

$$6) \int_{\frac{r_z - r_o}{2}}^{\frac{r_z - r_o}{2}} b \sin\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db.$$

Интегралы 1, 3 и 5 вида аналогичные интегралам с выражений (3.34), (3.35), (3.36). Интегралы 2, 4, 6 вида аналогичны интегралам с выражений (3.56), (3.57) и (3.58), но отличаются пределами интегрирования.

Решение второго вида интеграла. После подстановки будем иметь:

$$\begin{aligned} & \int_{\frac{r_z - r_o}{2}}^{\frac{r_z - r_o}{2}} \cos^2\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db = \\ & = \frac{b}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2\right) \arcsin\left(\frac{b}{r_{kp}}\right) - Ar_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}}\right)^2} \arctg\left(\frac{b \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{A \sqrt{r_{kp}^2 - b^2}}\right) \Bigg|_{\frac{r_z - r_o}{2}}^{\frac{r_z - r_o}{2}} = \\ & = \frac{r_z - r_o}{4} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2\right) \arcsin\left(\frac{r_z - r_o}{2r_{kp}}\right) - Ar_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}}\right)^2} \times \\ & \times \arctg\left(\frac{(r_z - r_o) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{2A \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2}}\right) - \left(-\left(\frac{r_z - r_o}{4} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2} - \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2\right) \arcsin\left(\frac{r_z - r_o}{2r_{kp}}\right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + Ar_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}}\right)^2} \arctg\left(\frac{(r_z - r_o) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{2A \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2}}\right)\right) \right) = \frac{r_z - r_o}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2} + 2\left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2\right) \times \\ & \times \arcsin\left(\frac{r_z - r_o}{2r_{kp}}\right) - 2Ar_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}}\right)^2} \arctg\left(\frac{(r_z - r_o) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{2A \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2}}\right). \quad (3.71) \end{aligned}$$

Решение интеграла четвертого вида. После подстановки будем иметь:

$$\begin{aligned}
& \int_{\frac{r_z - r_o}{2}}^{\frac{r_z - r_o}{2}} \sin\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db = \\
& = A \left(\sqrt{r_{kp}^2 - b^2} - b \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} \ln \left(\frac{b \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - b^2}}{\sqrt{b^2 + A^2}} \right) \right) \Bigg|_{\frac{r_z - r_o}{2}}^{\frac{r_z - r_o}{2}} = \\
& = A \left(\sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2} - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} \ln \left(\frac{\left(\frac{r_z - r_o}{2}\right) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2 + A^2}} \right) \right) - \\
& - \left(\sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2} - \left(-\frac{r_z - r_o}{2}\right) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} \ln \left(\frac{\left(-\frac{r_z - r_o}{2}\right) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2 + A^2}} \right) \right) = \\
& = A \left(\left(\frac{r_z - r_o}{2}\right) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} \ln \left(\frac{\left(\left(\frac{r_z - r_o}{2}\right) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2}\right) \sqrt{\left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2 + A^2}}{\sqrt{\left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2 + A^2} \left(\left(-\frac{r_z - r_o}{2}\right) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2}\right)} \right) \right) = \\
& = A \left(\left(\frac{r_z - r_o}{2}\right) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} \ln \left(\frac{\left(\left(\frac{r_z - r_o}{2}\right) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2}\right) \sqrt{\left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2 + A^2}}{\left(\left(-\frac{r_z - r_o}{2}\right) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2} + \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2}\right)^2}\right)} \right) \right). \quad (3.72)
\end{aligned}$$

Решение интеграла шестого вида. После подстановки будем иметь

$$\begin{aligned}
& \int_{\frac{r_z - r_o}{2}}^{\frac{r_z - r_o}{2}} b \sin\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right) \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} db = \\
& = A \frac{b}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - b^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2\right) \arcsin\left(\frac{b}{r_{kp}}\right) - A r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}}\right)^2} \times =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \arctg \left(\frac{b \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{A \sqrt{r_{kp}^2 - b^2}} \right) \Bigg|_{\frac{r_z - r_o}{2}}^{\frac{r_z - r_o}{2}} = A \left(\frac{r_z - r_o}{4} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} + \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2 \right) \arcsin \left(\frac{r_z - r_o}{2r_{kp}} \right) - \right. \\
& \left. - Ar_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}} \right)^2} \arctg \left(\frac{(r_z - r_o) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{2A \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2}} \right) - \left(\frac{r_z - r_o}{4} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} - \right. \right. \\
& \left. \left. - \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2 \right) \arcsin \left(\frac{r_z - r_o}{2r_{kp}} \right) + + Ar_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}} \right)^2} \arctg \left(\frac{(r_z - r_o) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{2A \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2}} \right) \right) \right) = \\
& = A \left(\frac{r_z - r_o}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} + 2 \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + A^2 \right) \arcsin \left(\frac{r_z - r_o}{2r_{kp}} \right) - \right. \\
& \left. - 2Ar_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{A}{r_{kp}} \right)^2} \arctg \left(\frac{(r_z - r_o) \sqrt{r_{kp}^2 + A^2}}{2A \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2}} \right) \right). \quad (3.73)
\end{aligned}$$

После подстановки решенных интегралов в выражения (3.68), (3.69) и (3.70) окончательно будем иметь:

$$\begin{aligned}
P_{o.c6} &= \varphi m_{c6} \frac{h_6}{r_{kp} n} \left(\frac{h_6}{2\pi} \ln \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) - ctg(\delta + \varphi_{TP}) \left(\frac{r_z - r_o}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \left(r_{kp}^2 + \frac{h_6^2}{2\pi^2} \right) \arcsin \left(\frac{r_z - r_o}{2r_{kp}} \right) - \frac{h_6}{\pi} r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{h_6}{2\pi r_{kp}} \right)^2} \arctg \left(\frac{\pi(r_z - r_o) \sqrt{r_{kp}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2}}{h_6 \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2}} \right) \right) \right). \quad (3.74) \\
R_{u.o.c6} &= \varphi m_{c6} \frac{h_6}{n} \left(\left(r_z - r_o + \frac{h_6}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) + ctg(\delta + \varphi_{TP}) \frac{h_6}{2\pi r_{kp}} \times \right.
\end{aligned}$$

$$\times \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right) \sqrt{r_{kp}^2 + \frac{h_6^2}{2\pi^2}} \ln \left(\frac{\left(\left(\frac{r_z - r_o}{2} \right) \sqrt{r_{kp}^2 + \frac{h_6^2}{2\pi^2}} + \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} \right)}{\left(\left(-\frac{r_z - r_o}{2} \right) \sqrt{r_{kp}^2 + \frac{h_6^2}{2\pi^2}} + \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} \right)} \right) \right). \quad (3.75)$$

$$\begin{aligned} M_{u.o.cb} = \varphi m_{cb} \frac{h_6^2}{2\pi r_{kp} n} & \left(\frac{h_6}{2\pi} \left(\frac{\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1}{2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_2} + \ln \left(\frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \right) \right) + \frac{ctg(\delta + \varphi_{TP})}{r_{kp}} \times \right. \\ & \times \left(\frac{r_z - r_o}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} + 2 \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2 \right) \arcsin \left(\frac{r_z - r_o}{2r_{kp}} \right) - \right. \\ & \left. \left. - \frac{h_6}{\pi} r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{h_6}{2\pi r_{kp}} \right)^2} \arctg \left(\frac{\pi(r_z - r_o) \sqrt{r_{kp}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2}}{h_6 \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2}} \right) \right) \right). \quad (3.76) \end{aligned}$$

Выражения (3.74), (3.75) и (3.76) позволяют определять проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей, для ножевого ИО геохода с выпуклой формой режущей кромки ножа в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_z – радиуса головной секции геохода, r_o – радиуса образующей, h_6 – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геохода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_z , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_o , r_{kp} – радиуса кривизны режущей кромки ножа.

Впервые разработаны выражения для определения усилий резания, зависящих от ширины среза, ножевого ИО геохода с выпуклой формой режущей кромки ножа.

Таким образом, усовершенствована математическая модель определения силовых параметров ножевых ИО геохода в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_z – радиуса головной секции геохода, r_o – радиуса образующей,

h_e – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геохода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_e , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_o , $\gamma_{но}$ – угла наклона ножа, $r_{кр}$ – радиуса кривизны режущей кромки ножа.

3.4 Определение энергоемкости разрушения породы забоя ножевым исполнительным органом геохода

Для определения энергоемкости разрушения породы забоя ножевым исполнительным органом геохода принято выражение (1.37), приведенное в работах Ветрова Ю.А. [83].

В числителе выражения (1.37) представлена сила резания ножевым ИО, а в знаменателе геометрический параметр разрушаемого массива горных пород [104].

Геометрическим параметром при проходке выработки ножевым ИО геохода, оказывающим влияние на энергоемкость разрушения породы забоя, является площадь поперечного сечения прорези.

Для ножевого ИО площадь поперечного сечения прорези (Рисунок 1.13) определяется из выражения [83]:

$$F_{cp} = bh + k_{бок}^2 h^2 ctg\gamma, \quad (3.77)$$

где b – ширина ножа, м; h – глубина резания, м; $k_{бок}$ – коэффициент глубины расширяющей части прорези; γ – угол наклона расширяющей части прорези к горизонту, град.

Основными силовыми параметрами ножевого исполнительного органа геохода являются: проекция полной силы резания на ось вращения геохода (P_0) и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода ($R_{ИО}$), а также момент сопротивления резанию ($M_{ИО}$), действие которых представлено на Рисунке 3.12.

При определении энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода, сила резания ножом (P_e) из выражения (1.37), равна проекции полной силы

резания, на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода ($R_{ИО}$) разделенную на количество ножей n [104]. Следовательно, выражение (1.37) примет вид:

$$H_w = \frac{R_{ИО}}{nF_{cp}}. \quad (3.78)$$

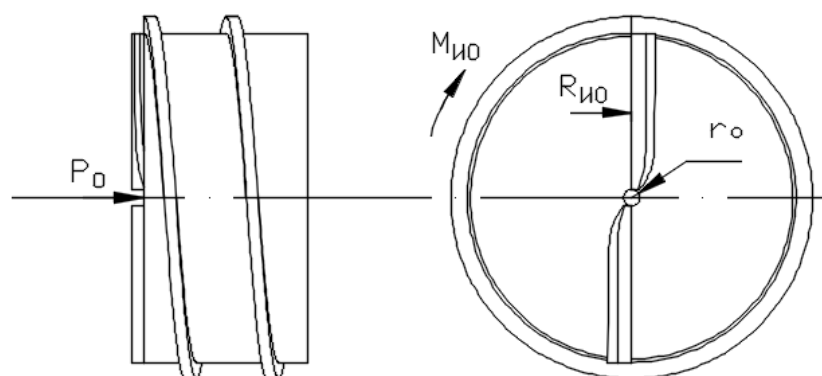


Рисунок 3.12 – Расчетная схема силовых параметров ножевого ИО геохода

Для ножевого исполнительного органа геохода полная проекция силы резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения определяется по выражению (1.33).

В условиях проходки геоходом прорезью является разрушаемый уступ. Основываясь на особенностях работы геохода, уступ формируется геликоидной формы.

Для определения площади поперечного сечения прорези при проходке геоходом разделим площадь поперечного сечения прорези на две составляющие, одна из которых зависит от ширины среза (ножа) b , а другая нет. Первую составляющую обозначим $F_{cp.св.}$, вторую - $F_{cp.бок.}$. Тогда на основании выражения (3.77):

$$F_{cp.св.} = bh, \quad (3.79)$$

$$F_{cp.бок.} = k_{бок}^2 h^2 ctg\gamma. \quad (3.80)$$

Составляющая площадь поперечного сечения прорези, зависящая от ширины среза, для элементарного участка ножа ИО (db) определяется по выражению:

$$dF_{cp.св} = hdb. \quad (3.81)$$

Подставив в (3.81) выражения (1.2), (1.3) и затем, проинтегрировав по db , получим:

$$F_{cp.св} = \int_{r_o}^{r_z} \frac{h_B}{n} \cos \left(\arctg \left(\frac{h_6}{2\pi b} \right) \right) db. \quad (3.82)$$

$\arctg \left(\frac{h_6}{2\pi b} \right) = t$, отсюда $b = \frac{h_6}{2\pi g t}$ после дифференцирования по $\frac{db}{dt}$ будем иметь

$$db = -\frac{h_6}{2\pi g^2 t} \cdot \frac{1}{\cos^2 t} dt = -\frac{h_6}{2\pi \sin^2 t} dt.$$

После подстановки будем иметь:

$$\begin{aligned} F_{cp.св} &= -\frac{h_6^2}{2\pi n} \int_{r_o}^{r_z} \cos t \frac{1}{\sin^2 t} dt = -\frac{h_6^2}{2\pi n} \int_{r_o}^{r_z} \frac{\cos t}{\sin^2 t} dt = -\frac{h_6^2}{2\pi n} \int_{r_o}^{r_z} \frac{d \sin t}{\sin^2 t} dt = -\frac{h_6^2}{2\pi n} \cdot \frac{\sin^{-1} t}{-1} \Big|_{r_o}^{r_z} = \\ &= \frac{h_6^2}{2\pi n} \cdot \frac{1}{\sin t} \Big|_{r_o}^{r_z} = \frac{h_6^2}{2\pi n} \cdot \frac{1}{\sin \left(\arctg \left(\frac{h_6}{2\pi b} \right) \right)} \Big|_{r_o}^{r_z} \end{aligned}$$

поскольку $\arctg \left(\frac{h_6}{2\pi r_o} \right) = \beta_2$ а $\arctg \left(\frac{h_6}{2\pi r_z} \right) = \beta_1$ то

$$F_{cp.св} = \frac{h_6^2 (\sin \beta_2 - \sin \beta_1)}{2\pi n \sin \beta_1 \sin \beta_2}. \quad (3.83)$$

Подставив в (3.82) выражения (1.2), (1.3), получим:

$$F_{cp.бок} = k_{бок}^2 \frac{h_6^2}{2n^2} \operatorname{ctg} \gamma (\cos^2 \beta_1 + \cos^2 \beta_2). \quad (3.84)$$

Подставив в (3.78) выражения (3.83), (3.84) и (1.33), получим:

$$H_w = \frac{n(R_{u.o.св} + R_{u.o.бок})}{n \left(\frac{h_6^2 (\sin \beta_2 - \sin \beta_1)}{2\pi n \sin \beta_1 \sin \beta_2} + k_{бок}^2 \frac{h_6^2}{2n^2} \operatorname{ctg} \gamma (\cos^2 \beta_1 + \cos^2 \beta_2) \right)}. \quad (3.85)$$

После упрощения **окончательно будем иметь:**

$$H_w = \frac{R_{и.о.св} + R_{и.о.бок}}{\frac{h_6^2}{2n^2} \left(\frac{\sin \beta_2 - \sin \beta_1}{\pi \sin \beta_1 \sin \beta_2} + \frac{k_{бок}^2}{n} \operatorname{ctg} \gamma (\cos^2 \beta_1 + \cos^2 \beta_2) \right)}. \quad (3.86)$$

Выражение (3.86) позволяет определять энергоёмкость разрушения породы забоя ножевым ИО геохода в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_2 – радиуса головной секции геохода, r_o – радиуса образующей, h_6 – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геохода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_2 , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_o , $\gamma_{ио}$ – угла наклона ножа, $r_{кр}$ – радиуса кривизны режущей кромки ножа.

Впервые получено выражение для определения энергоёмкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода.

3.5 Выводы

1) Определены геометрические параметры конструктивных решений ИО геохода (r_2 – радиус головной секции геохода, r_o – радиус образующей, h_6 – шаг внешнего движителя, n – количество лучей на ИО геохода, $\gamma_{ио}$ – угол наклона ножа при наклонной форме режущей кромки ножа, $r_{кр}$ – радиус кривизны режущей кромки при полувыпуклой и выпуклой форме ножа).

2) Форма режущей кромки не влияет на касательную составляющую силы резания и нормальную составляющую силы резания, независимую от ширины среза.

2) Получены выражения для определения значения нормальной силы блокированного резания в зависимости от параметров геосреды, геометрических параметров ножа (δ – угла резания, b – ширины среза, $r_{кр}$ – радиуса кривизны режущей кромки ножа полувыпуклой и выпуклой формы).

3) Получены выражения для определения проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, независимой от ширины среза, на ось вращения ге-

охода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_z – радиуса головной секции геохода, r_o – радиуса образующей, h_e – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геохода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_z , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_o .

4) Получены выражения для определения проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей, для ножевого ИО геохода с прямой формой режущей кромки ножа в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_z – радиуса головной секции геохода, r_o – радиуса образующей, h_e – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геохода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_z , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_o .

5) Получены выражения для определения проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей, для ножевого ИО геохода с наклонной формой режущей кромки ножа в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_z – радиуса головной секции геохода, r_o – радиуса образующей, h_e – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геохода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_z , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геохода, расположенной на расстоянии r_o , $\gamma_{но}$ – угла наклона ножа.

6) Получены выражения для определения проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения геохода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей, для ножевого ИО геохода с полувыпуклой формой режущей кромки ножа в зависимости от параметров геосреды, δ – угла

резания, r_z – радиуса головной секции геолода, r_o – радиуса образующей, h_g – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геолода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геолода, расположенной на расстоянии r_z , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геолода, расположенной на расстоянии r_o , $r_{кр}$ – радиуса кривизны режущей кромки ножа.

7) Получены выражения для определения проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения геолода и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей, для ножевого ИО геолода с выпуклой формой режущей кромки ножа в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_z – радиуса головной секции геолода, r_o – радиуса образующей, h_g – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геолода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геолода, расположенной на расстоянии r_z , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геолода, расположенной на расстоянии r_o , $r_{кр}$ – радиуса кривизны режущей кромки ножа.

8) Усовершенствована математическая модель взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_z – радиуса головной секции геолода, r_o – радиуса образующей, h_g – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геолода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геолода, расположенной на расстоянии r_z , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геолода, расположенной на расстоянии r_o , $\gamma_{но}$ – угла наклона ножа при наклонной форме режущей кромки ножа, $r_{кр}$ – радиуса кривизны режущей кромки при полувыпуклой и выпуклой форме ножа.

9) Впервые получено выражение для определения энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геолода в зависимости от параметров геосреды, δ – угла резания, r_z – радиуса головной секции геолода, r_o – радиуса образующей, h_g – шага внешнего движителя, n – количества лучей на ИО геолода, β_1 – угла перемещения точки ножа ИО геолода, расположенной на расстоянии r_z , β_2 – угла перемещения точки ножа ИО геолода, расположенной на расстоянии r_o , $\gamma_{но}$ – угла

наклона ножа при наклонной форме режущей кромки ножа, $r_{кр}$ – радиуса кривизны режущей кромки при полувыпуклой и выпуклой форме ножа.

Сформированные выводы являются итогами решения второй поставленной в диссертации задачи – «Усовершенствовать математическую модель взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя».

Основным результатом работы является усовершенствованная математическая модель взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя, которая содержит систему аналитических уравнений для определения усилий резания и энергоемкости процесса разрушения, включая параметры кривизны режущих кромок ножей исполнительного органа геолода.

4 ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГЕОХОДА НА СИЛОВЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЕГО С ПОРОДОЙ ЗАБОЯ

Для того, чтобы проследить влияние конструктивных решений ИО геохода на силовые и энергетические параметры взаимодействия его с породой забоя необходимо:

- принять параметры геосреды для условий резания острыми ножами;
- определить влияние геометрических параметров конструктивных решений ИО геохода на силовые параметры взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя;
- определить влияние геометрических параметров конструктивных решений ИО геохода на энергоемкость разрушения породы забоя.

4.1 Параметры геосреды для условий резания острыми ножами

В выражениях (3.28) – (3.76) присутствуют параметры геосреды. Для получения зависимостей силовых и энергетических параметров взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя от геометрических параметров конструктивных решений ИО геохода необходимо определить параметры геосреды при условии строительства подземных сооружений геоходом с ножевым ИО.

Из п. 1.3 ножевым ИО характерно резание мягких пород с коэффициентом крепости до $f = 1$ по шкале профессора М.М. Протодяконова. Для исследования зависимостей силовых и энергетических параметров взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя от геометрических параметров конструктивных решений принята порода с коэффициентом крепости $f = 1$ – слабый песчаник.

Для слабого песчаника Ветровым В.Ю. определены величины удельной силы резания и коэффициентов условия работы острыми ножами [85]. Значения этих параметров представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Величины удельной силы резания и ее коэффициентов для условий работы острыми ножами

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Коэффициент, учитывающий влияние угла резания	φ		0,59
Удельная сила резания в лобовой части прорези при угле резания 45^0	$m_{св}$	Н/м ²	97000
Сила разрушения в боковых частях прорези	$m_{бок}$	Н/м ²	36000
Удельная сила среза одним из боковых ребер ножа	$m_{бок.ср}$	Н/м	8490
Угол резания	δ	град	25
Угол трения	$\varphi_{тр}$	град	31,4
Коэффициент глубины расширяющей части прорези	$k_{бок}$		0,9
Угол наклона расширяющей части прорези к горизонту	$\gamma_{нр}$	град	30

Принятые параметры геосреды позволяют определять силовые и энергетические параметры ножевого ИО геохода в среде слабого песчаника.

4.2 Влияние геометрических параметров конструктивных решений исполнительного органа геохода на его силовые параметры

К геометрическим параметрам конструктивных решений ИО геохода относятся радиус геохода $r_с$, радиуса образующей r_0 , шаг внешнего движителя h_B , количество лучей на ИО геохода n , угол наклона ножа к плоскости, перпендикулярной оси вращения $\gamma_{ио}$ и радиус кривизны режущей кромки ножа $r_{кр}$.

По выражениям (3.28) – (3.76) определяются зависимости проекции полной силы сопротивления породы резанию на ось вращения геохода (P_O), а также проекции на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода ($R_{ио}$) и момент со-

противления резанию ($M_{ИО}$) для острых ножей от геометрических параметров конструктивных решений ИО геолода.

4.2.1 Влияние радиуса геолода на силовые параметры конструктивных решений исполнительного органа геолода

На Рисунке 4.1 представлена зависимость проекции полной силы резания на ось вращения геолода (P_O) для острых ножей от радиуса геолода. Значения проекции полной силы резания на ось вращения геолода получены при постоянных $r_o=0,05$ м; $h_e=0,1$ м; $n=2$ шт.

По оси ординат, представленной зависимости, отложены значения проекции полной силы резания на ось вращения геолода (Н), а по оси абсцисс – радиус геолода (м).

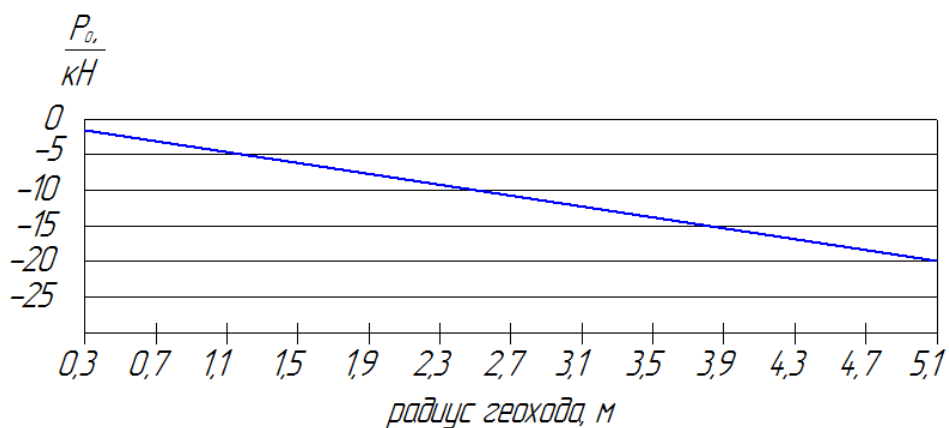


Рисунок 4.1 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геолода от радиуса геолода

Отрицательные значения проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геолода (P_O) показывают, что усилия направлены в массив горных пород.

Из графика (Рисунок 4.1) видно, что проекция силы резания на ось вращения геолода (P_O) с увеличением радиуса геолода уменьшается линейно.

Создание геолодов представляет интерес получения зависимости изменения

проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геохода, приходящихся на один метр периметра поверхности забоя, в зависимости от радиуса геохода.

График, выражающий зависимость $\frac{P_o}{2\pi r_z}$, как функцию r_z , приведен на Рисунке 4.2.

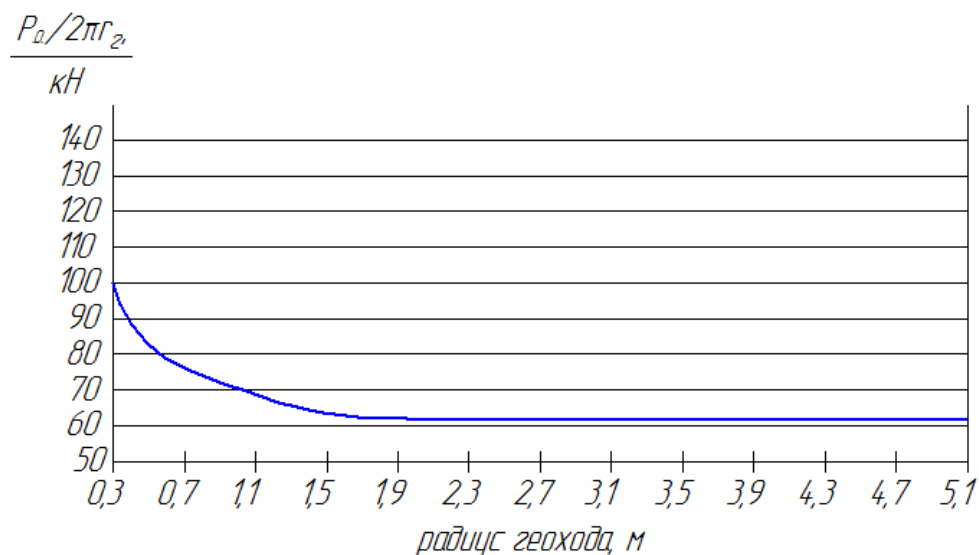


Рисунок 4.2 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геохода, приходящихся на один метр периметра поверхности забоя от радиуса геохода

В результате анализа зависимости установлено, что при увеличении радиуса геохода происходит:

- резкое уменьшение значения проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геохода, приходящихся на один метр периметра поверхности забоя в диапазоне от 0,3 до 1,3 м на 34%;
- при радиусе геохода больше 1,3 м значение усилия практически не изменяется.

График изменения проекции на плоскость перпендикулярную оси вращения геохода (РИО) для острых ножей от радиуса геохода представлен на Рисунке 4.3. Значения силы получены при постоянных $r_o=0,05$ м; $h_b=0,1$ м; $n=2$ шт.

По оси ординат, представленной зависимости, отложены значения проекции силы резания на плоскость перпендикулярную оси вращения геохода (Н), а по оси

абсцисс – радиус геохода (м).

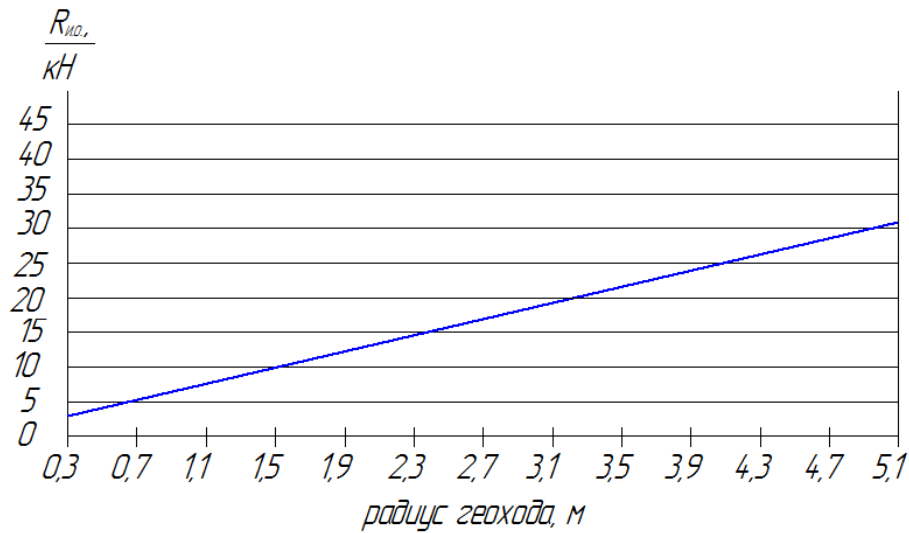


Рисунок 4.3 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения от радиуса геохода

Проекция силы резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения, с увеличением радиуса геохода увеличивается линейно.

На Рисунке 4.4 построена зависимость момента сопротивления резанию ($M_{по}$) для острых ножей при изменении радиуса геохода. Значения момента сопротивления резанию получены при постоянных $r_o=0,05$ м; $h_e=0,1$ м; $n=2$ шт.

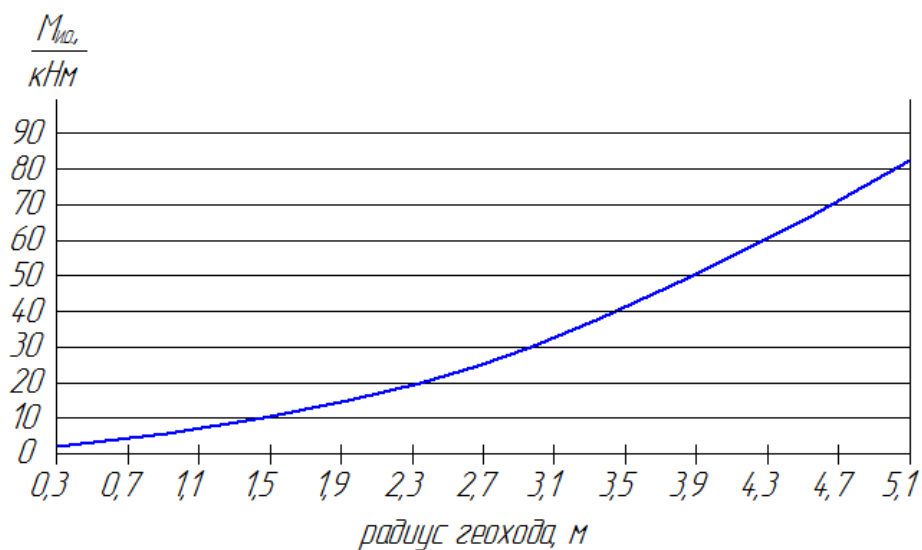


Рисунок 4.4 – Зависимость момента сопротивления резанию от радиуса геохода

По оси ординат отложены значения полного момента сопротивления резанию ($\text{Н}\cdot\text{м}$), а по оси абсцисс – радиус геохода (м).

Момент сопротивления резанию увеличивается нелинейно. При увеличении радиуса геохода от 0,3 м до 2,5 м, значение момента увеличивается в среднем на 20 кНм, при $r_z > 2,5$ м увеличивается на 59 кНм.

С увеличением радиуса геохода силовые параметры взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя увеличиваются.

4.2.2 Влияние радиуса образующей на силовые параметры конструктивных решений исполнительного органа геохода

Зависимость проекции полной силы резания на ось вращения геохода для острых ножей от радиуса образующей представлена на Рисунке 4.5. Значения силы получены при постоянных $h_6=0,1$ м; $n=2$ шт.

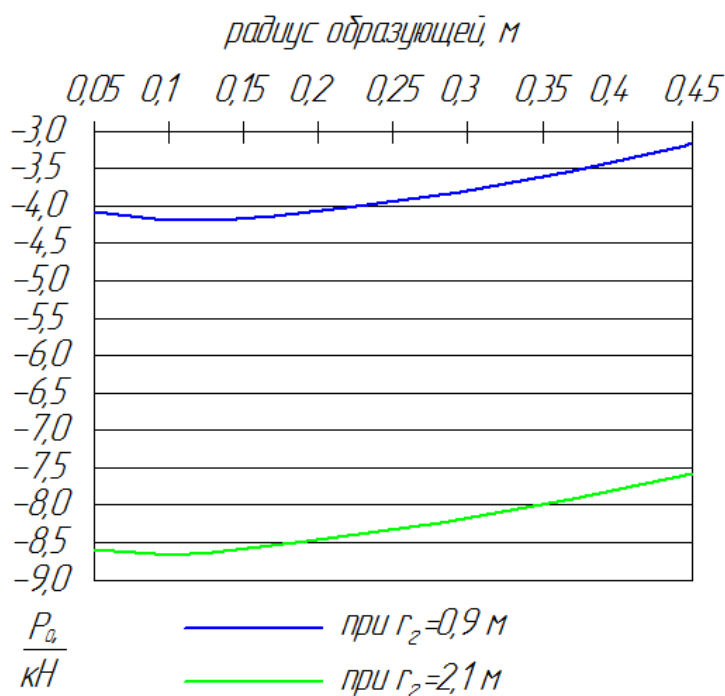


Рисунок 4.5 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геохода от радиуса образующей

По оси ординат отложены значения проекции полной силы резания на ось вращения геохода (H), а по оси абсцисс – радиус образующей (м).

Проекция силы сопротивления резанию на ось вращения геохода (P_O) с увеличением радиуса образующей до $r_o=0,1$ м уменьшается, а при $r_o>0,1$ м увеличиваются нелинейно.

В результате анализа зависимости установлено, что при увеличении радиуса образующей происходит:

- увеличение затягивания ножевого ИО геохода в массив при значениях r_o от 0,05 м до 0,1 м на 3%;
- уменьшение затягивания ножевого ИО геохода в массив при значениях r_o от 0,1 м до 0,45 м на 24% при $r_z=0,9$ м и на 12% при $r_z=2,1$ м.

Следовательно, возможность заклинивания геохода в выработке при больших значениях радиуса образующей будет меньше, чем при $r_o<0,1$ м. Однако большие значения r_o приведут к неразрешенному забою в центре.

На Рисунке 4.6 построен график изменения проекции на плоскость перпендикулярную оси вращения геохода ($R_{ИО}$) для острых ножей от радиуса образующей. Значения получены при постоянных $h_e=0,1$ м; $n=2$ шт.

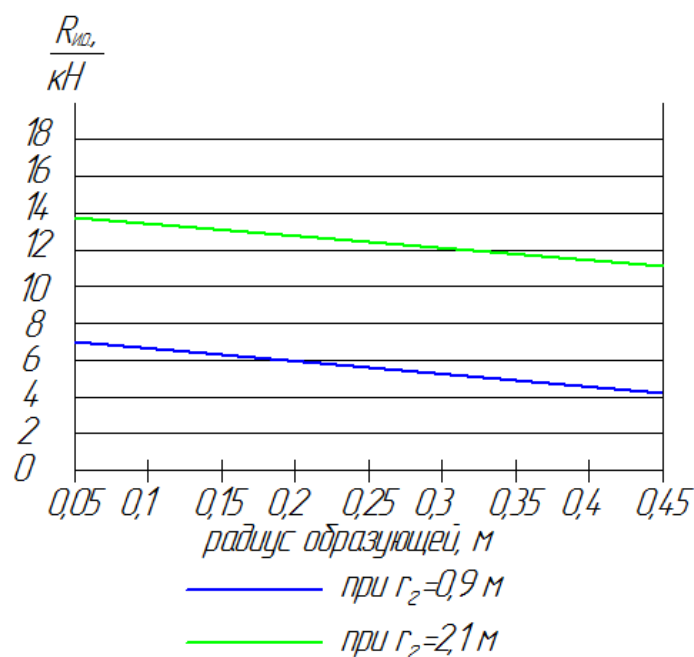


Рисунок 4.6 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения от радиуса образующей

По оси ординат, представленной зависимости, отложены значения проекции полной силы сопротивления породы резанию на плоскость перпендикулярную оси вращения геохода (Н), а по оси абсцисс изменение радиуса образующей (м).

Проекция силы резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода, с увеличением радиуса образующей уменьшается нелинейно.

Зависимость момента сопротивления резанию ($M_{ио}$) для острых ножей от радиуса образующей представлена на Рисунке 4.7. Значения момента получены при постоянных $h_6=0,1$ м; $n=2$ шт.

По оси ординат отложены значения момента сопротивления резанию (Н·м), а по оси абсцисс – радиус образующей (м).

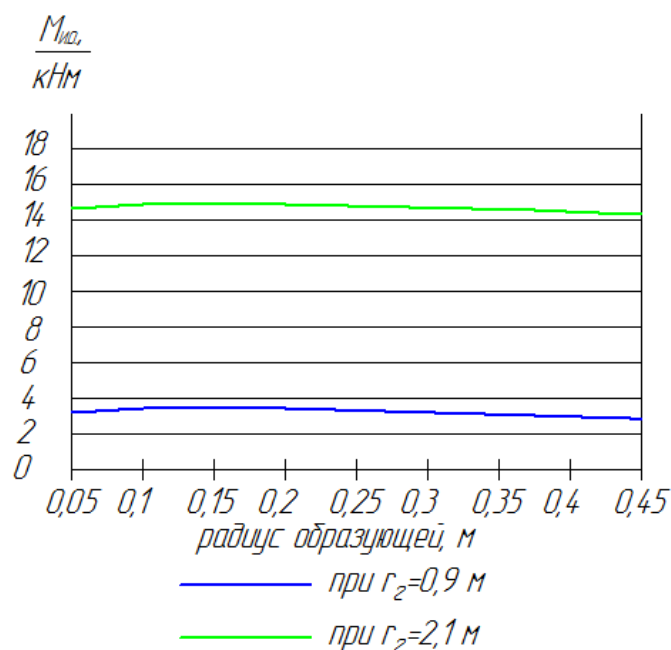


Рисунок 4.7 – Зависимость момента сопротивления резанию от радиуса образующей

Момент сопротивления резанию (Рисунок 4.7) изменяется нелинейно. При увеличении радиуса образующей до 0,15 м, усилия увеличиваются на 220 Нм, но при значениях r_0 от 0,15 м до 0,45 м момент сопротивления резанию начинает уменьшаться с увеличением радиуса образующей на 1050 Нм при любом радиусе геохода.

4.2.3 Влияние шага внешнего движителя на силовые параметры конструктивных решений исполнительного органа геохода

На Рисунке 4.8 представлена зависимость проекции полной силы резания на ось вращения геохода (P_o) для острых ножей при изменении шага внешнего движителя геохода. Значения проекции получены при постоянных $r_e=0,3$ м; $r_o=0,05$ м; $n=2$ шт.

Энергоемкость перемещения геохода делает целесообразным применение угла подъема винтовой линии движителя $3^\circ < \beta < 16^\circ$ [105]. Следовательно, целесообразное значение шага внешнего движителя для принятых условий будет находиться в интервале от 0,1 м до 0,55 м.

По оси ординат отложены значения проекции полной силы резания на ось вращения геохода (Н), а по оси абсцисс – шаг внешнего движителя (м).

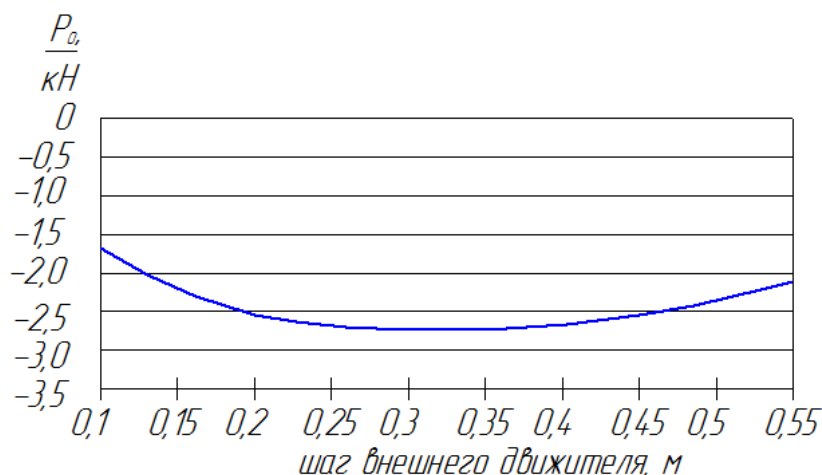


Рисунок 4.8 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геохода от шага внешнего движителя

Из графика (Рисунок 4.8) видно, что проекция силы сопротивления резанию на ось вращения геохода (P_o) изменяется нелинейно.

В интервале от 0,1м до 0,32 м усилие уменьшится на 61 %, при значениях $0,32 \text{ м} < h_g < 0,55 \text{ м}$ проекция силы сопротивления резанию на ось вращения геохода увеличится на 23%.

На Рисунке 4.9, построен график изменения проекции силы резания на плоскость перпендикулярную оси вращения геохода ($R_{ио}$) для острых ножей от шага внешнего движителя. Значения проекции получены при постоянных $r_z=0,3$ м; $r_o=0,05$ м; $n=2$ шт.

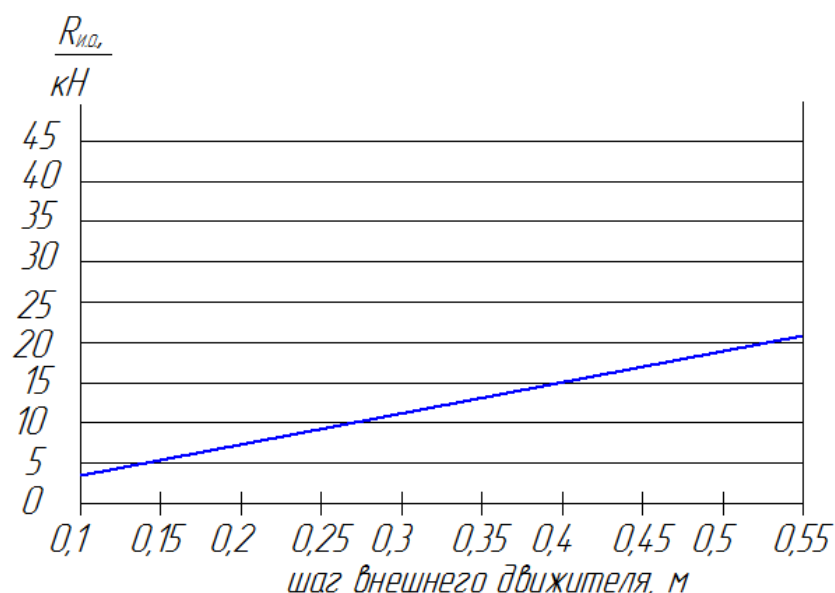


Рисунок 4.9 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения, от шага внешнего движителя

По оси ординат отложены значения проекции силы резания на плоскость перпендикулярную оси вращения геохода (Н), а по оси абсцисс – шаг внешнего движителя (м).

Зависимость проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения, от шага внешнего движителя (Рисунок 4.9) линейная. С увеличением шага внешнего движителя проекция силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения, увеличивается. В интервале $0,1 \text{ м} < h_6 < 0,55 \text{ м}$ увеличиваются в среднем на 18 кН.

Зависимость момента сопротивления резанию ($M_{ио}$) для острых ножей от шага внешнего движителя представлена на Рисунке 4.10. Значения момента получены при постоянных $r_z=0,3$ м; $r_o=0,05$ м; $n=2$ шт.

По оси ординат отложены значения момента сопротивления резанию (Н·м), а по оси абсцисс – шага внешнего движителя (м).

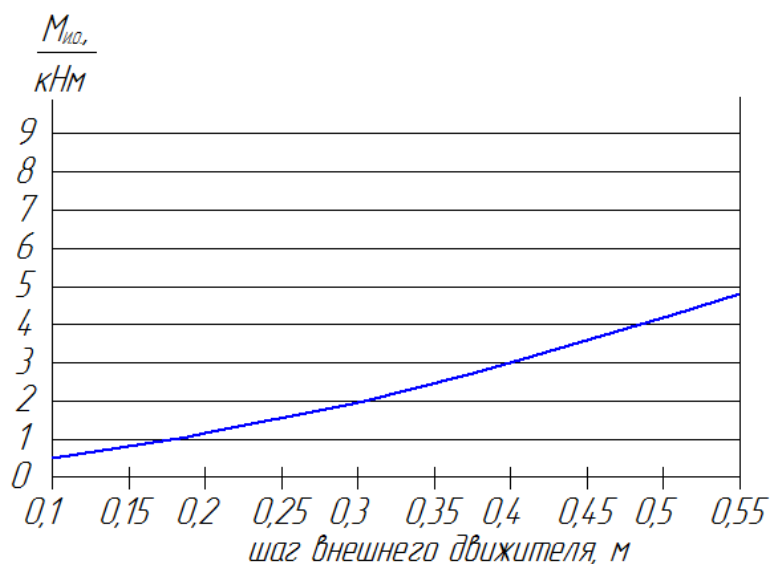


Рисунок 4.10 – Зависимость момента сопротивления резанию от шага внешнего движителя геохода

В результате анализа зависимости установлено, что при увеличении шага внешнего движителя происходит:

- нелинейное увеличение момента сопротивления резанию;
- значение момента сопротивления резанию увеличится на 4,3 кН в интервале $0,1 \text{ м} < h_6 < 0,55 \text{ м}$;

4.2.4 Влияние количества лучей на силовые параметры конструктивных решений исполнительного органа геохода

На Рисунке 4.11 построен график изменения проекции полной силы резания на ось вращения геохода (P_O) для острых ножей при изменении количества лучей. Значения получены при постоянных $r_z=1,5 \text{ м}$; $r_o=0,05 \text{ м}$.

По оси ординат отложены значения проекции полной силы сопротивления породы резанию на ось вращения геохода (Н), а по оси абсцисс – количество лучей на ИО (шт).

В ходе анализа зависимости установлено, что при увеличении числа ножей происходит [106]:

- нелинейное уменьшение проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геохода;
- в интервале от 2 до 8 шт. при $\beta=3^\circ$ значения проекции полной силы сопротивления породы резанию на ось вращения геохода уменьшаются 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 значение проекции полной силы сопротивления породы резанию на ось вращения геохода.

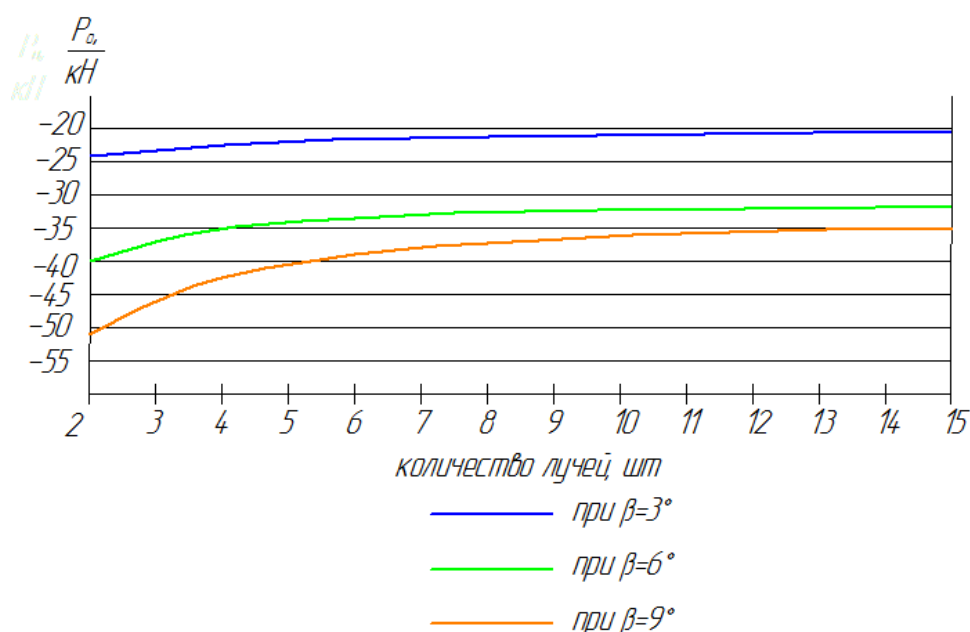


Рисунок 4.11 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геохода от количества лучей

График изменения проекции силы резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода, ($R_{\text{ИО}}$) для острых ножей от количества лучей представлен на Рисунке 4.12. Значения проекции получены при постоянных $r_c=1,5$ м; $r_o=0,05$ м.

По оси ординат отложены значения проекции силы резания на плоскость перпендикулярную оси вращения геохода (Н), а по оси абсцисс – количество лучей на ИО (шт).

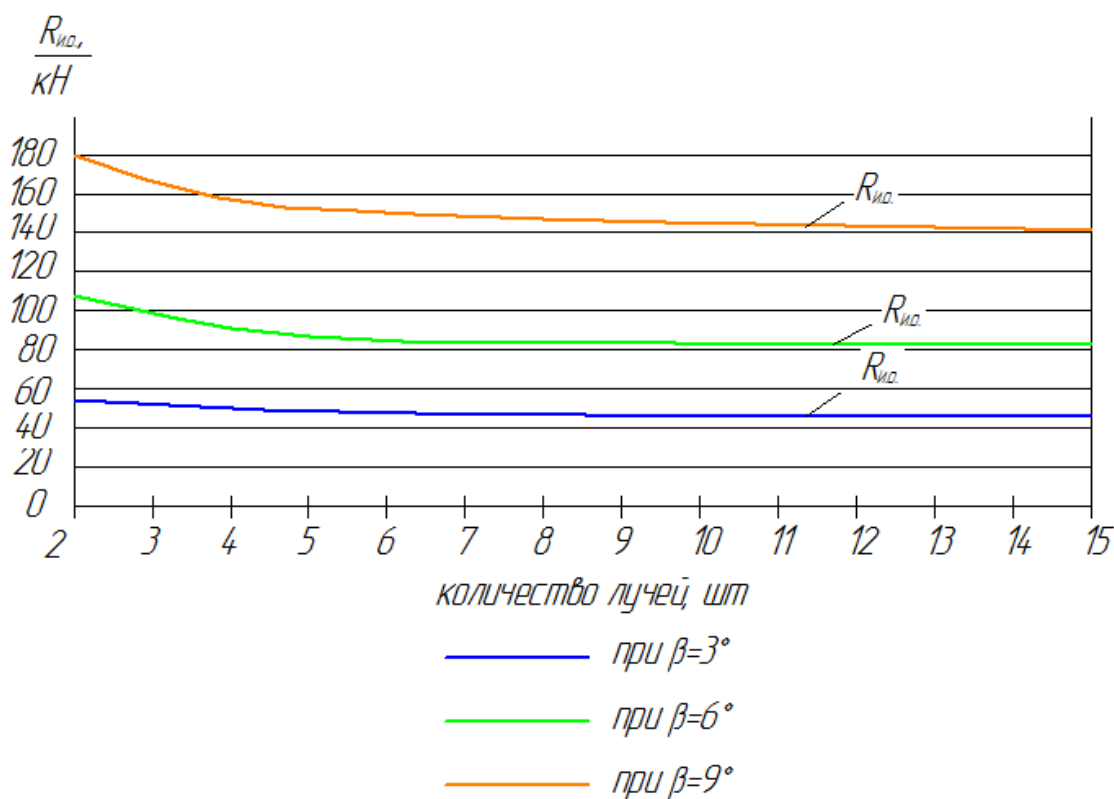


Рисунок 4.12 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения, от количества лучей на ИО

Проекция силы резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения, с увеличением количества лучей на ИО уменьшается нелинейно.

При количестве ножей от 2 до 8 шт проекция силы резания, на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода, ($R_{ИО}$) уменьшается при $\beta=3^\circ$ до 8%; при $\beta=6^\circ$ до 16% и при $\beta=9^\circ$ до 20%;

Увеличение числа ножей больше 8 шт. не значительно влияет на значение усилия резания [105].

На Рисунке 4.13 построена зависимость момента сопротивления резанию ($M_{ИО}$) для острых ножей от количества лучей. Значения момента получены при постоянных $r_z=1,5$ м; $r_o=0,05$ м.

По оси ординат отложены значения момента сопротивления резанию (Н·м), а по оси абсцисс – количество лучей на ИО (шт).

В результате анализа зависимости установлено, что при увеличении количества лучей происходит:

- нелинейное уменьшение момента сопротивления резанию;
- в интервале от 2 до 8 шт. при $\beta=3^\circ$ значения момента сопротивления резанию уменьшаются 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 значение момента сопротивления резанию.

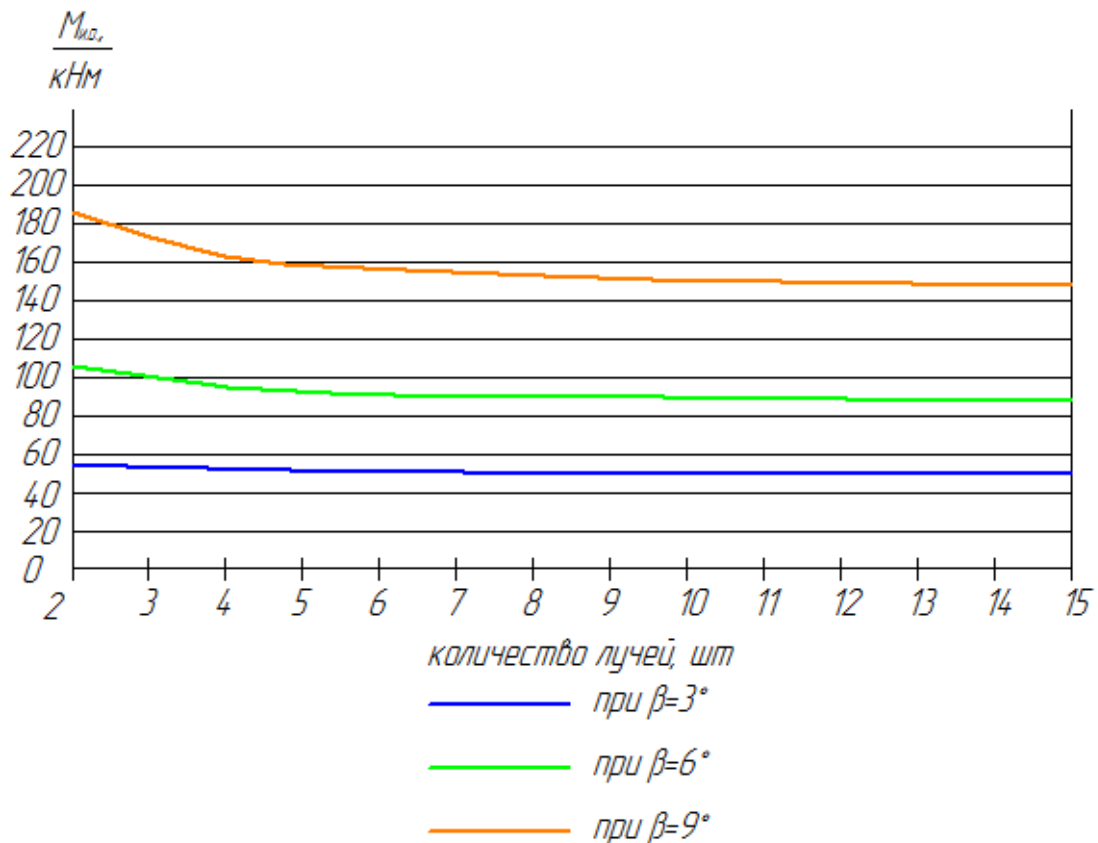


Рисунок 4.13 – Зависимость момента сопротивления резанию от количества лучей на ИО

С увеличением количества лучей, установленных на ИО геолода, в диапазоне от 2 до 8 шт. силы резания уменьшаются до 8% при $\beta=3^\circ$; при $\beta=6^\circ$ до 16% и при $\beta=9^\circ$ до 20%. Дальнейшее увеличение числа лучей не значительно влияет на силовые параметры взаимодействия ножевого ИО геолода с породой забоя при принятых параметрах геореды.

4.2.5 Влияние угла наклона ножа на силовые параметры конструктивных решений исполнительного органа геохода

На Рисунке 4.14 построен график изменения проекции усилия резания на ось вращения геохода (P_o) для острых ножей от угла наклона ножа. Значения проекции определены при постоянных $r_z=1,5$ м; $r_o=0,05$ м; $h_6=1,5$ м; $n=2$ шт.

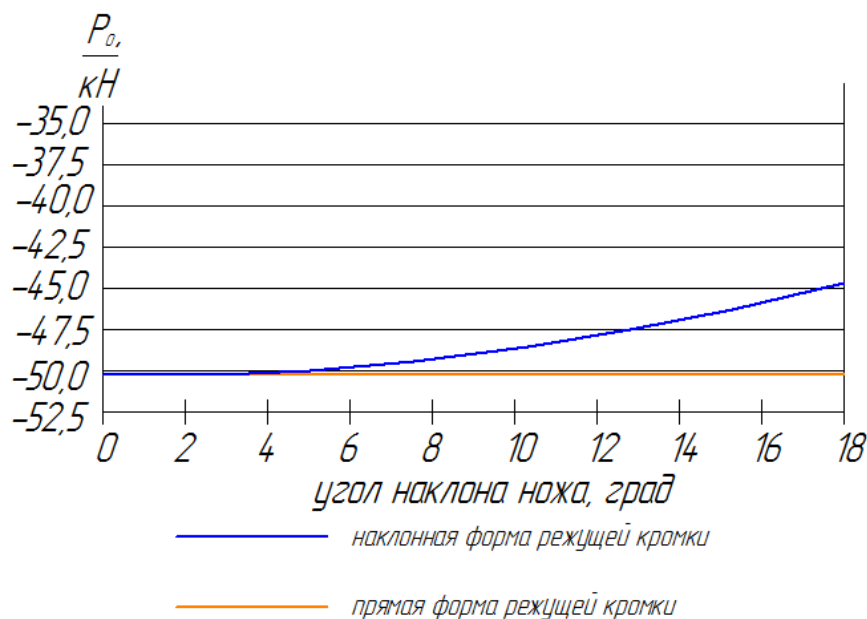


Рисунок 4.14 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геохода от угла наклона ножа

По оси ординат отложены значения проекции полной силы сопротивления породы резанию на ось вращения геохода (Н), а по оси абсцисс – угол наклона ножа ИО (град).

Проекция усилия резания на ось вращения геохода с увеличением угла наклона ножа увеличивается нелинейно. В интервале от 0 до 18 град уменьшение значения проекции полной силы сопротивления породы резанию на ось вращения геохода до 10 %.

На Рисунке 4.15 построен график изменения проекции усилия резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода ($R_{ИО}$) для острых ножей от угла наклона ножа. Значения проекции определены при постоянных $r_z=1,5$ м; $r_o=0,05$ м; $h_6=1,5$ м; $n=2$ шт.

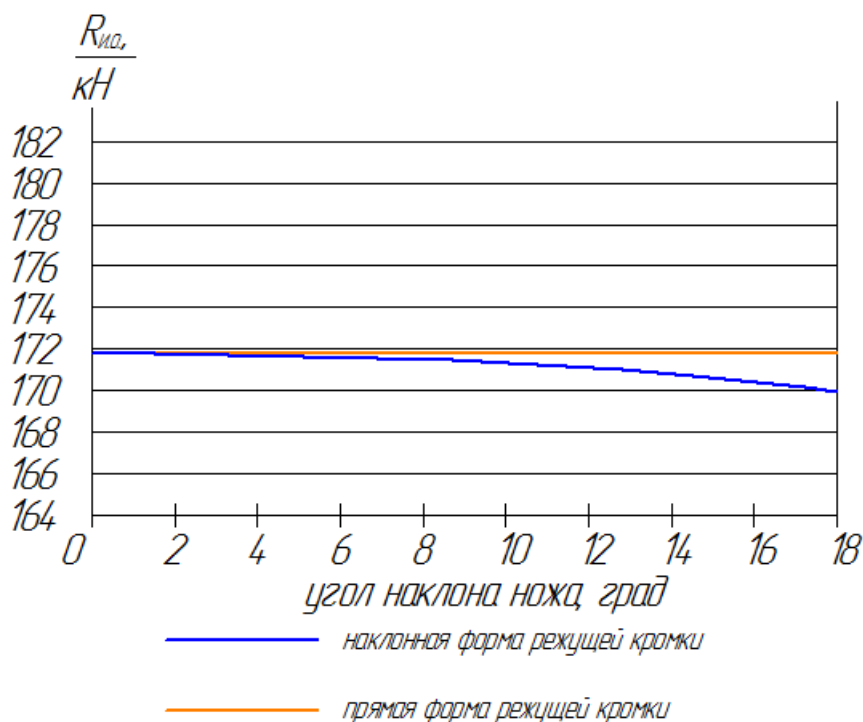


Рисунок 4.15 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения от угла наклона ножа

По оси ординат отложены значения проекции на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода, (Н) а по оси абсцисс – угол наклона ножа ИО (град).

Зависимость проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения, (Рисунок 4.15) от угла наклона ножа ИО уменьшается нелинейно. При $0^\circ < \gamma_{ио} \leq 18^\circ$ происходит уменьшение проекции усилия резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода до 1,2%.

Таким образом, угол наклона ножа не значительно влияет на значение проекции усилия резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода.

Зависимость момента сопротивления резанию ($M_{ио}$) для острых ножей от угла наклона ножа представлена на Рисунке 4.16. Значения $M_{ио}$ определены при постоянных $r_z=1,5$ м; $r_o=0,05$ м; $h_g=1,5$ м; $n=2$ шт.

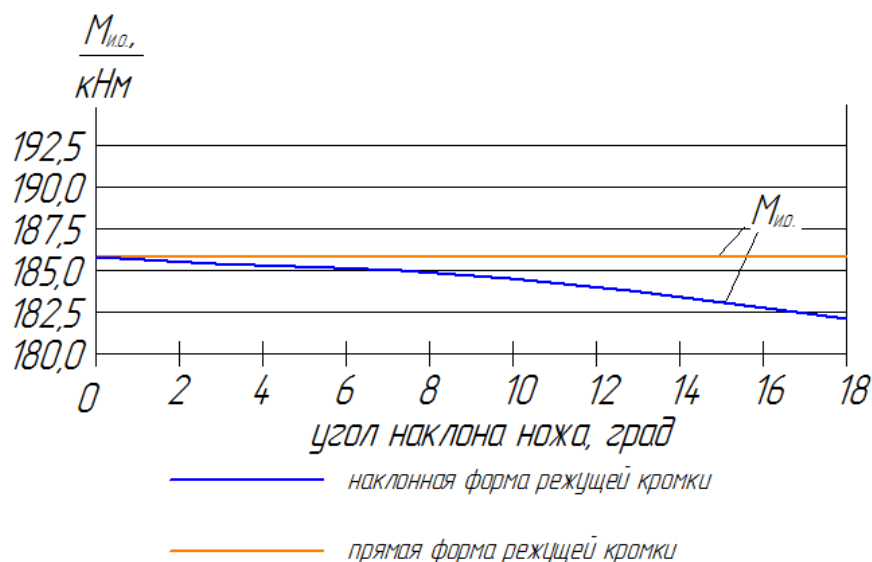


Рисунок 4.16 – Зависимость момента сопротивления резанию от угла наклона ножа

По оси ординат отложены значения момента сопротивления резанию (Н·м), а по оси абсцисс – угол наклона ножа ИО (град).

В ходе анализа зависимости установлено, что при увеличении угла наклона ножа происходит:

- нелинейное уменьшение значения момента сопротивления резанию;
- в рассматриваемом диапазоне изменения угла наклона ножа происходит уменьшение значения момента сопротивления резанию до 1,6%. В связи с этим угол наклона ножа не значительно влияет на момент сопротивления резанию.

4.2.6 Влияние радиуса кривизны режущей кромки ножа на силовые параметры конструктивных решений исполнительного органа геохода

На Рисунке 4.17 построен график изменения проекции усилия резания на ось вращения геохода (P_O) для острых ножей от радиуса кривизны режущей кромки ножа ИО. Значения проекции определены при постоянных $r_2=1,5$ м; $r_o=0,05$ м; $h_6=1,5$ м; $n=2$ шт.

Полувывпуклая форма режущей кромки ножа накладывает ограничение на минимальное значение радиуса кривизны, которое не может быть меньше радиуса геохода. При выпуклой форме режущей кромки значение радиуса кривизны не может быть меньше $\frac{r_z - r_o}{2}$. Таким образом, область построения зависимости будет разная. При полувывпуклой форме $r_z \leq r_{кр} < +\infty$ до, и $\frac{r_z - r_o}{2} \leq r_{кр} < +\infty$ при выпуклой.

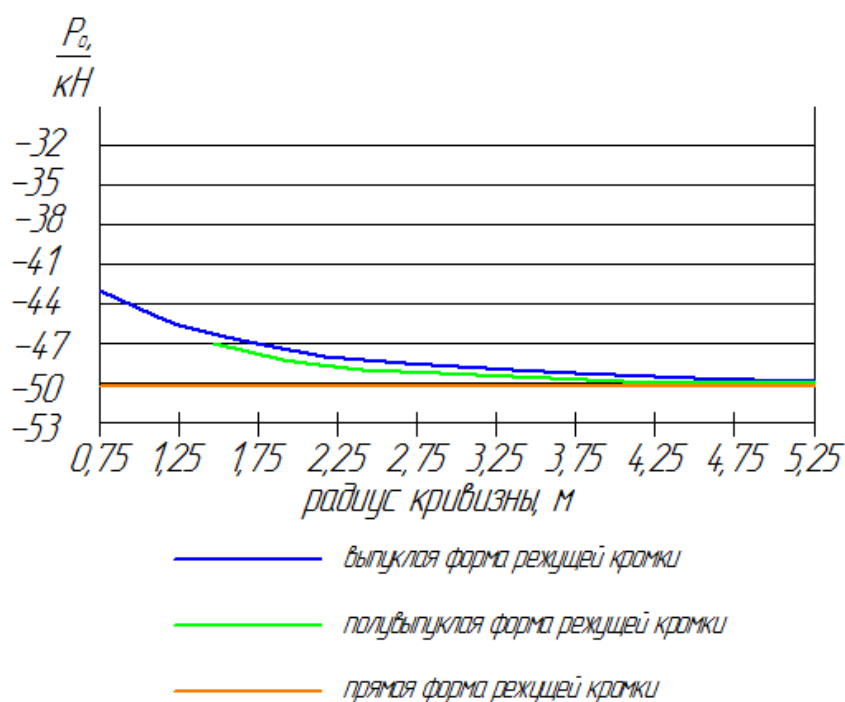


Рисунок 4.17 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геохода от радиуса кривизны режущей кромки ножа ИО

По оси ординат отложены значения проекции полной силы сопротивления породы резанию на ось вращения геохода (Н), а по оси абсцисс – радиус кривизны режущей кромки ножа ИО (м).

В ходе анализа зависимости установлено, что при увеличении радиуса кривизны режущей кромки ножа происходит:

- нелинейное уменьшение проекции усилия резания на ось вращения геохода при любой форме режущей кромки ножа, отличной от прямой;

- значение проекции усилия резания на ось вращения геохода при $r_{кр} = \frac{r_z - r_o}{2}$ на 13% больше при выпуклой форме режущей кромки ножа, чем при прямой форме;
- значение проекции усилия резания на ось вращения геохода при $r_{кр} = r_z$ на 6% больше при полувыпуклой форме режущей кромки, чем при прямой форме;
- при полувыпуклой форме режущей кромки ножа значение усилия уменьшится на 4% в интервале $1,5 < r_{кр} < 2,75$ м;
- при выпуклой форме режущей кромки ножа значение проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геохода уменьшится на 6% в интервале $0,75 < r_{кр} < 1,75$ м;
- при полувыпуклой и выпуклой формах режущей кромки ножа увеличение радиуса кривизны больше 2,75 м и 1,75 м соответственно, не значительно влияет на значение проекции усилия резания на ось вращения геохода.

На Рисунке 4.18 построен график изменения проекции усилия резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода, ($R_{ИО}$) для острых ножей от радиуса кривизны режущей кромки ножа ИО. Значения проекции усилия резания определены при постоянных $r_z=1,5$ м; $r_o=0,05$ м; $h_b=1,5$ м; $n=2$ шт.

По оси ординат отложены значения проекции усилия резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода, (Н) а по оси абсцисс – радиус кривизны режущей кромки ножа ИО (м).

В результате анализа зависимости установлено, что при увеличении радиуса кривизны режущей кромки ножа происходит:

- нелинейное увеличение значения проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения, от радиуса кривизны режущей кромки ножа ИО при любой форме режущей кромки ножа;
- значение проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения при $r_{кр} = \frac{r_z - r_o}{2}$ на 13% меньше при выпуклой форме режущей кромки ножа, чем при прямой форме;

– значение проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения при $r_{кр} = r_c$ на 6% меньше при полувыпуклой форме режущей кромки ножа, чем при прямой форме;

– при полувыпуклой форме режущей кромки ножа проекция силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения, увеличится на 4% в интервале $1,5 < r_{кр} < 2,75$ м;

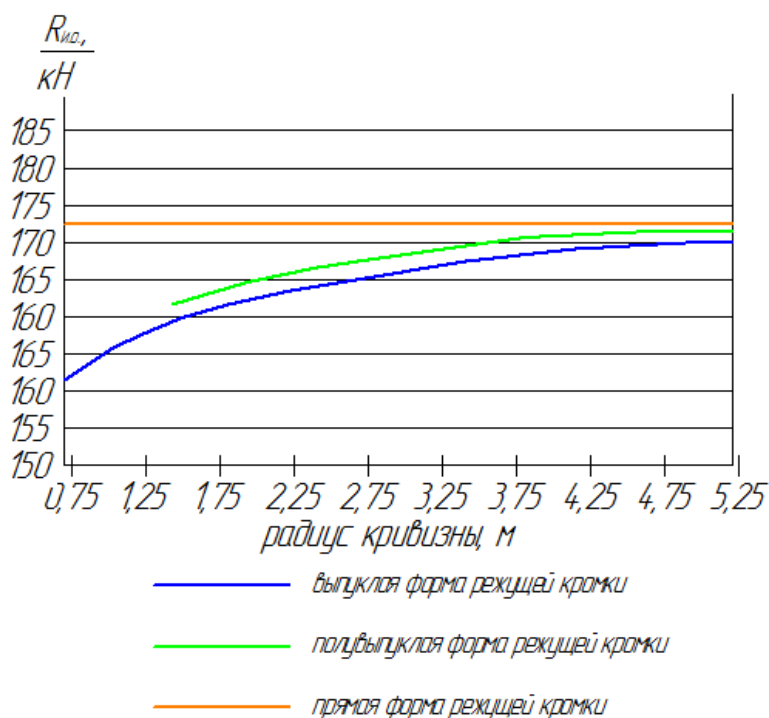


Рисунок 4.18 – Зависимость проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения, от радиуса кривизны режущей кромки ножа ИО

– при выпуклой форме режущей кромки ножа значение проекции силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения, увеличится на 6% в интервале $0,75 < r_{кр} < 1,75$ м;

– при полувыпуклой и выпуклой формах режущей кромки ножа увеличение радиуса кривизны режущей кромки ножа больше 2,75 м и 1,75 м соответственно, не значительно влияет на значение проекции усилия резания на плоскость, перпендикулярную оси вращения.

На Рисунке 4.19 построен график изменения момента сопротивления резанию ($M_{ио}$) для острых ножей от радиуса кривизны режущей кромки ножа ИО.

Значения момента определены при постоянных $r_z=1,5$ м; $r_o=0,05$ м; $h_e=1,5$ м; $n=2$ шт.

По оси ординат отложены значения момента (Н·м), а по оси абсцисс – значения радиуса кривизны режущей кромки ножа ИО (м).

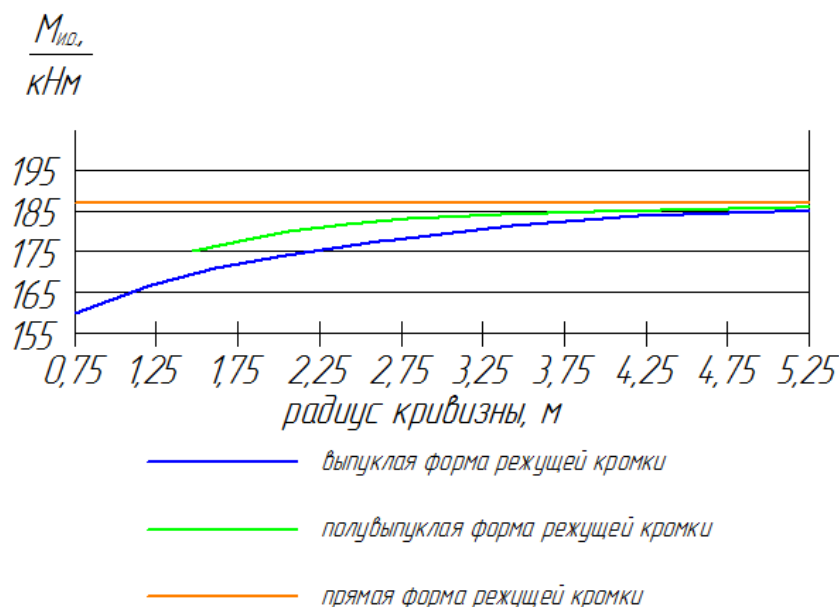


Рисунок 4.19 – Зависимость момента сопротивления резанию от радиуса кривизны режущей кромки ножа ИО

В ходе анализа зависимости установлено, что при увеличении радиуса кривизны режущей кромки ножа происходит:

- нелинейное увеличение момента сопротивления резанию при любой форме режущей кромки ножа;
- значение момента сопротивления резанию при $r_{кр} = \frac{r_z - r_o}{2}$ на 13% меньше при выпуклой форме режущей кромки, чем при прямой форме;
- значение момента сопротивления резанию при $r_{кр} = r_z$ на 6% меньше при полувыпуклой форме режущей кромки, чем при прямой форме;
- при полувыпуклой форме режущей кромки ножа значение момента увеличится на 4% в интервале $1,5 < r_{кр} < 2,75$ м;
- при выпуклой форме режущей кромки ножа значение момента сопротивления резанию увеличится на 6% в интервале $0,75 < r_{кр} < 1,75$ м;

– при полувыпуклой и выпуклой формах режущей кромки ножа увеличение радиуса кривизны режущей кромки ножа больше 2,75 м и 1,75 м соответственно, не значительно влияет на значение момента сопротивления резанию.

При одинаковых параметрах схемных решений ИО геохода значения силовых параметров взаимодействия ножевых ИО геохода с породой забоя при выпуклой форме режущей кромки ножа на 13% меньше, чем при прямой, наклонной форме и на 6% при полувыпуклой.

Следовательно, применение выпуклой формы режущей кромки ножа является предпочтительным, в связи с меньшими усилиями резания.

4.3 Влияние геометрических параметров конструктивных решений исполнительного органа геохода на энергоемкость разрушения породы забоя

По выражению (3.86) определяется зависимость энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода для острых ножей от радиуса геохода (Рисунок 4.20). Значения энергоемкости определены при постоянных $r_o=0,05$ м; $h_e=0,1$ м; $n=2$ шт.

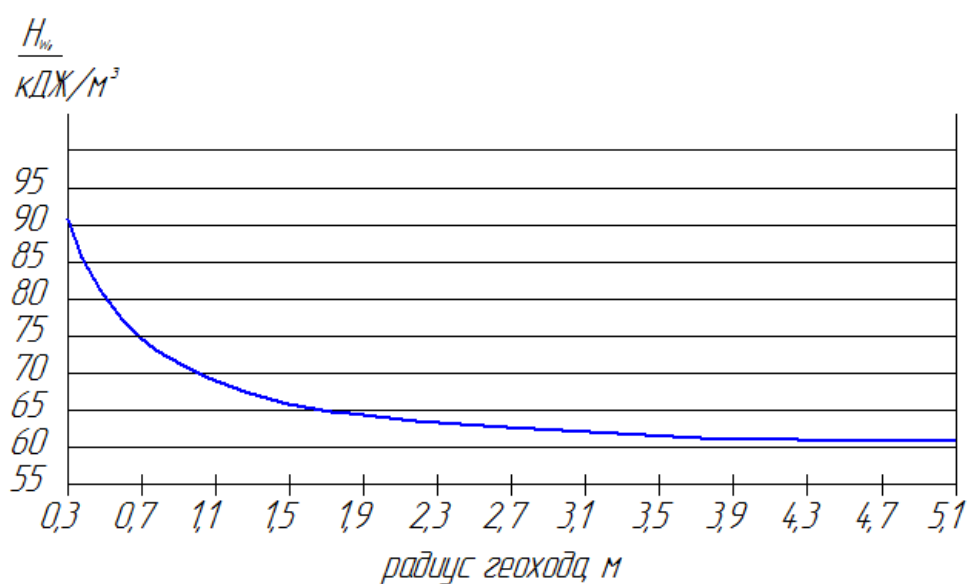


Рисунок 4.20 – Зависимость энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода от радиуса геохода

По оси ординат отложены значения энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода (Дж/м³), по оси абсцисс – радиус геохода (м).

В ходе анализа зависимости, представленной на Рисунке 4.20, следует что:

- значение энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода изменяется нелинейно в сторону уменьшения;
- при увеличении радиуса геохода от 0,3 м до 1,3 м энергетический параметр уменьшается на 37%;
- при увеличении радиуса геохода от 1,3 м до 5,1 м, энергетический параметр продолжает уменьшаться на 10%.

На Рисунке 4.21, построена зависимость энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода от радиуса образующей. Значения энергетического параметра определены при постоянных $h_e=0,1$ м; $n=2$ шт.

По оси ординат отложены значения энергетического параметра (Дж/м³), по оси абсцисс значения радиуса образующей (м).

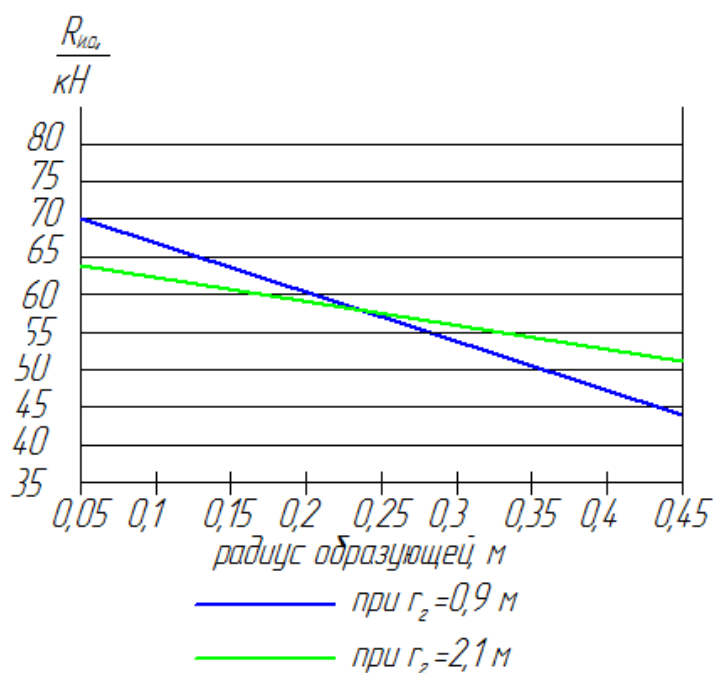


Рисунок 4.21 – Зависимость энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода от радиуса образующей

Энергоемкость разрушения породы забоя ножевым ИО геохода, с увеличением радиуса образующей уменьшается линейно.

На Рисунке 4.22, построен график изменения энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода от шага внешнего движителя [107, 108]. Значения получены при постоянных $r_z=0,3$ м; $r_o=0,05$ м; $n=2$ шт.

По оси ординат отложены значения энергетического параметра (Дж/м³), по оси абсцисс – шаг внешнего движителя (м).

В ходе анализа зависимости, представленной на Рисунке 4.22, следует что:

- значение энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода изменяется уменьшается нелинейно;
- при увеличении значения шага внешнего движителя от 0,1 м до 0,55 м энергетический параметр уменьшится на 18%.

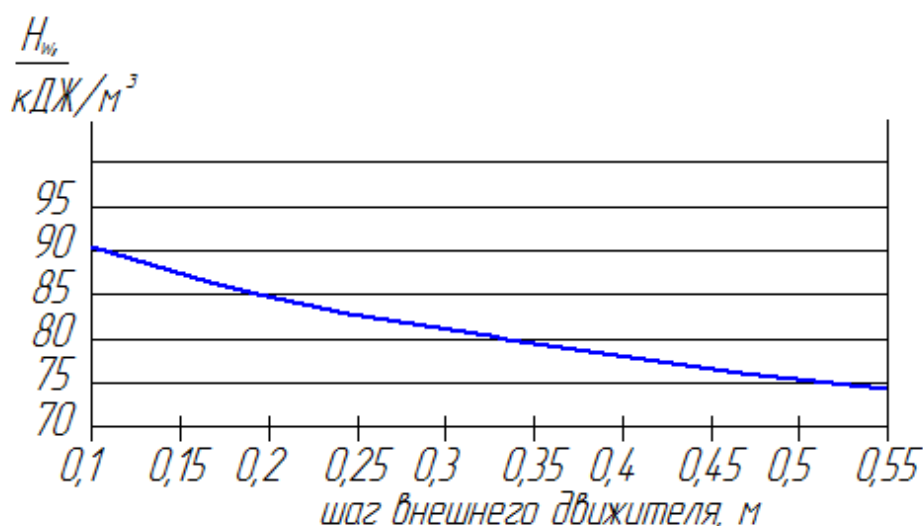


Рисунок 4.22 – Зависимость энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода от шага внешнего движителя

График изменения энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода от количества лучей представлен на Рисунке 4.23. Значения определены при постоянных $r_z=1,5$ м; $r_o=0,05$ м.

По оси ординат отложены значения энергетического параметра (Дж/м³), а по оси абсцисс – количество лучей на ИО (шт).

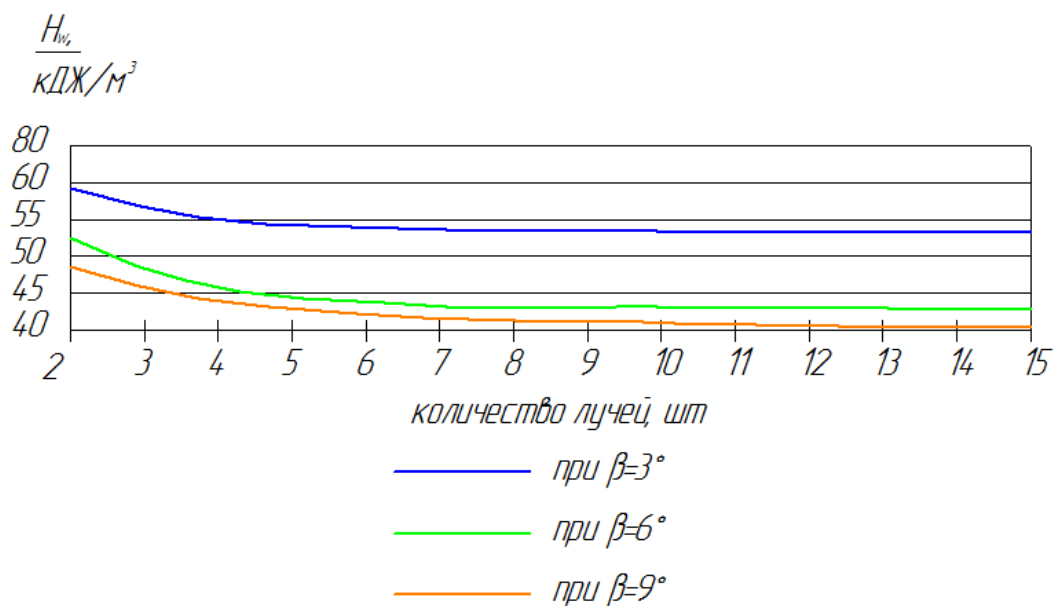


Рисунок 4.23 – Зависимость энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода от количества лучей

При количестве лучей от 2 до 8 шт. наблюдается уменьшение энергетического параметра при $\beta=3^\circ$ до 8%; при $\beta=6^\circ$ до 16% и при $\beta=9^\circ$ до 20%.

В диапазоне от 8 до 15 шт. уменьшается в среднем на 1%. Следовательно, увеличение числа ножей больше 8 шт. не значительно влияет на значение энергоемкости разрушения породы забоя [109].

На Рисунке 4.24 построена зависимость энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода от угла наклона ножа [110]. Значения определены при постоянных $r_2=1,5$ м; $r_o=0,05$ м; $h_e=1,5$ м; $n=2$ шт.

По оси ординат отложены значения энергетического параметра (Дж/м³), по оси абсцисс – угол наклона ножа ИО (град).

В ходе анализа зависимости установлено, что при увеличении угла наклона ножа происходит:

- нелинейное уменьшение значения энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода;
- в рассматриваемом диапазоне угла наклона ножа происходит уменьшение энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода на 1%.

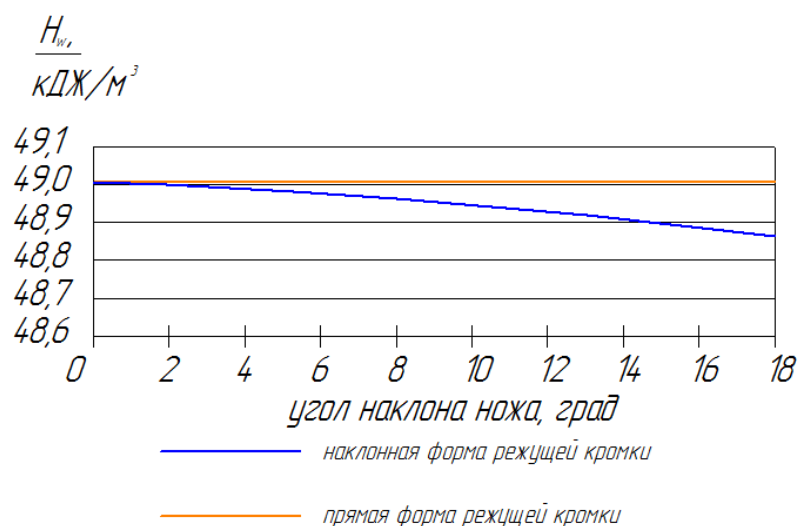


Рисунок 4.24 – Зависимость энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода от угла наклона ножа

На Рисунке 4.25 построен график изменения энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода от радиуса кривизны режущей кромки ножа ИО. Значения определены при постоянных $r_c=1,5$ м; $r_o=0,05$ м; $h_b=1,5$ м; $n=2$ шт.

По оси ординат отложены значения энергетического параметра (Дж/м³), по оси абсцисс – радиус кривизны режущей кромки ножа ИО (м).

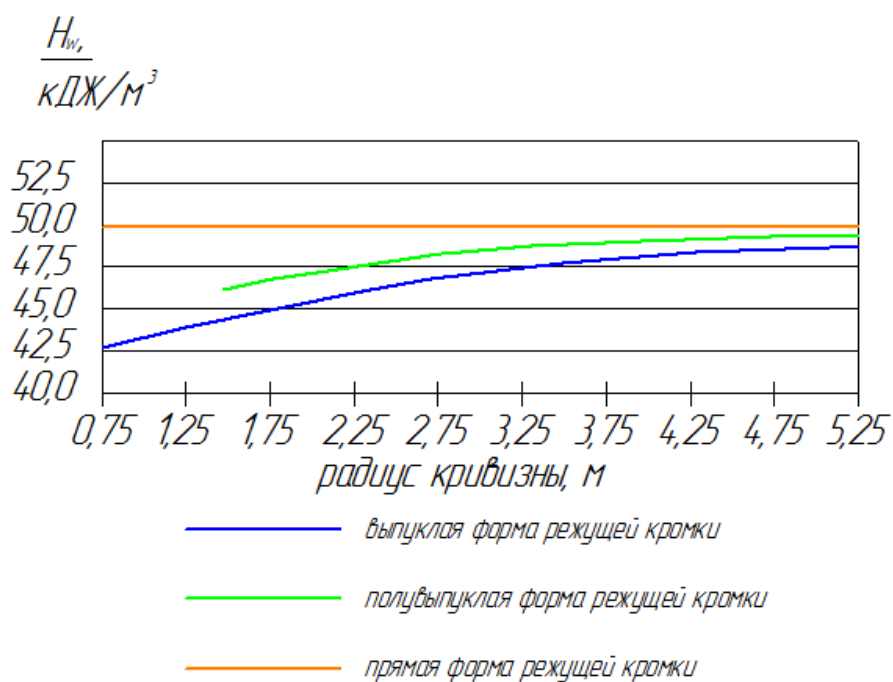


Рисунок 4.25 – Зависимость энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода от радиуса кривизны

В ходе анализа зависимости установлено, что при увеличении радиуса кривизны режущей кромки ножа происходит:

- нелинейное увеличение энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геолода при любой форме режущей кромки ножа;
- значение энергоемкости разрушения породы забоя при $r_{кр} = \frac{r_z - r_o}{2}$ на 13% меньше при выпуклой форме режущей кромки, чем при прямой форме;
- значение энергоемкости разрушения породы забоя при $r_{кр} = r_z$ на 6% меньше при полувыпуклой форме режущей кромки, чем при прямой форме;
- при полувыпуклой форме режущей кромки ножа значение энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геолода увеличится на 4% в интервале $1,5 < r_{кр} < 2,75$ м;
- при выпуклой форме режущей кромки ножа значение энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геолода увеличится на 6% в интервале $0,75 < r_{кр} < 1,75$ м;
- при полувыпуклой и выпуклой формах режущей кромки ножа увеличение радиуса кривизны режущей кромки ножа больше 2,75 м и 1,75 м соответственно, не значительно влияет на значение энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геолода.

При одинаковых параметрах схемных решений ИО геолода значения энергетического параметра при выпуклой форме режущей кромки ножа на 13% меньше, чем при прямой, наклонной форме и на 6% при полувыпуклой.

Следовательно, применение выпуклой формы режущей кромки ножа является предпочтительным, в связи с меньшими затратами энергии на резание.

4.4 Выводы

1) С увеличением радиуса геолода проекции полной силы сопротивления резанию на ось вращения геолода и на плоскость, перпендикулярную оси враще-

ния геохода, а также момент сопротивления резанию для острых ножей увеличиваются.

2) Проекция полной силы сопротивления резанию на ось вращения геохода и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода, а также момент сопротивления резанию для острых ножей уменьшаются с увеличением радиуса образующей.

3) С увеличением шага внешнего движителя проекции полной силы сопротивления грунта резанию на ось вращения геохода и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода, а также момент сопротивления резанию для острых ножей увеличиваются.

4) С увеличением количества лучей в диапазоне от 2 до 8 шт., установленных на ИО геохода, проекции полной силы сопротивления резанию на ось вращения геохода и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода, а также момент сопротивления резанию для острых ножей при $\beta=3^\circ$ уменьшаются до 8%; при $\beta=6^\circ$ до 16% и при $\beta=9^\circ$ до 20%. Дальнейшее увеличение лучей не значительно влияет на силовые параметры взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя.

5) Увеличение угла наклона ножа не значительно влияет на усилия резания.

6) При увеличении радиуса кривизны режущей кромки ножа происходит:

- увеличение усилий резания;
- значения усилий резания при $r_{кр} = \frac{r_z - r_o}{2}$ на 13% меньше при выпуклой форме режущей кромки ножа, чем при прямой форме;
- значения сил резания при $r_{кр} = r_z$ на 6% меньше при полувыпуклой форме режущей кромки ножа, чем при прямой форме;
- при полувыпуклой форме режущей кромки ножа значения проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геохода и момента сопротивления резанию увеличатся на 4% в интервале $1,5 < r_{кр} < 2,75$ м;

– при выпуклой форме режущей кромки ножа значения проекции силы сопротивления резанию на ось вращения геохода и момента сопротивления резанию увеличатся на 6% в интервале $0,75 < r_{кр} < 1,75$ м;

– при полувыпуклой и выпуклой формах режущей кромки ножа увеличение радиуса кривизны режущей кромки ножа больше 2,75 м и 1,75 м соответственно, не значительно влияет на значения усилий резания ножевым ИО геохода.

7) Увеличение радиуса геохода, радиуса образующей, шага внешнего движителя и количества лучей на ИО ведет к уменьшению энергоемкости разрушения породы забоя.

8) Увеличение радиуса кривизны режущей кромки ножа ведет к увеличению энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геохода.

9) Применение выпуклой формы режущей кромки ножа является предпочтительным, в связи с меньшими силовыми и энергетическими параметрами взаимодействия ножевого ИО геохода с породой забоя.

Представленные выводы являются итогами решения третьей поставленной в диссертационной работе задачи – «Определить влияние конструктивных решений ИО геохода на силовые и энергетические параметры взаимодействия его с породой забоя».

Полученные в ходе исследования выводы позволяют сформулировать следующие **научные положения**:

– 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.

5 РАЗРАБОТКА НОЖЕВОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО ОБРАЗЦА ГЕОХОДА

Основанием для разработки демонстрационного образца (ДО) геохода послужил проект «Разработка проходческого подземного аппарата класса «Геоход» (руководитель проекта – Аксенов В.В.), выполняемый в ООО "Сибирское НПО". Демонстрационный образец геохода должен продемонстрировать свое движение в геосреде с использованием геосреды.

Для разработки ножевого ИО демонстрационного образца геохода необходимо:

- разработать инженерную методику определения требуемых силовых и энергетических параметров ножевого ИО геохода;
- сформировать исходные данные;
- определить требуемые силовые и энергетические параметры ножевого ИО демонстрационного образца геохода.

5.1 Разработка инженерной методики определения силовых и энергетических параметров ножевого исполнительного органа геохода

Полученные выражения (3.28) – (3.76) и (3.86) позволяют определять силовые и энергетические параметры ножевого исполнительного органа геохода.

Порядок определения силовых и энергетических параметров ножевого исполнительного органа геохода представлен на Рисунке 5.1.

1) Исходные данные.

Исходные данные приведены в таблице 5.1.

Параметры геосреды принимаются из работ Ветрова В.Ю. [83-85].

2) Определение угла подъема винтовой линии движителя и угла атаки ножа в центре.

Угол подъема винтовой линии движителя определяется по выражению (1.1), а угол атаки ножа в центре – по выражению (1.2).

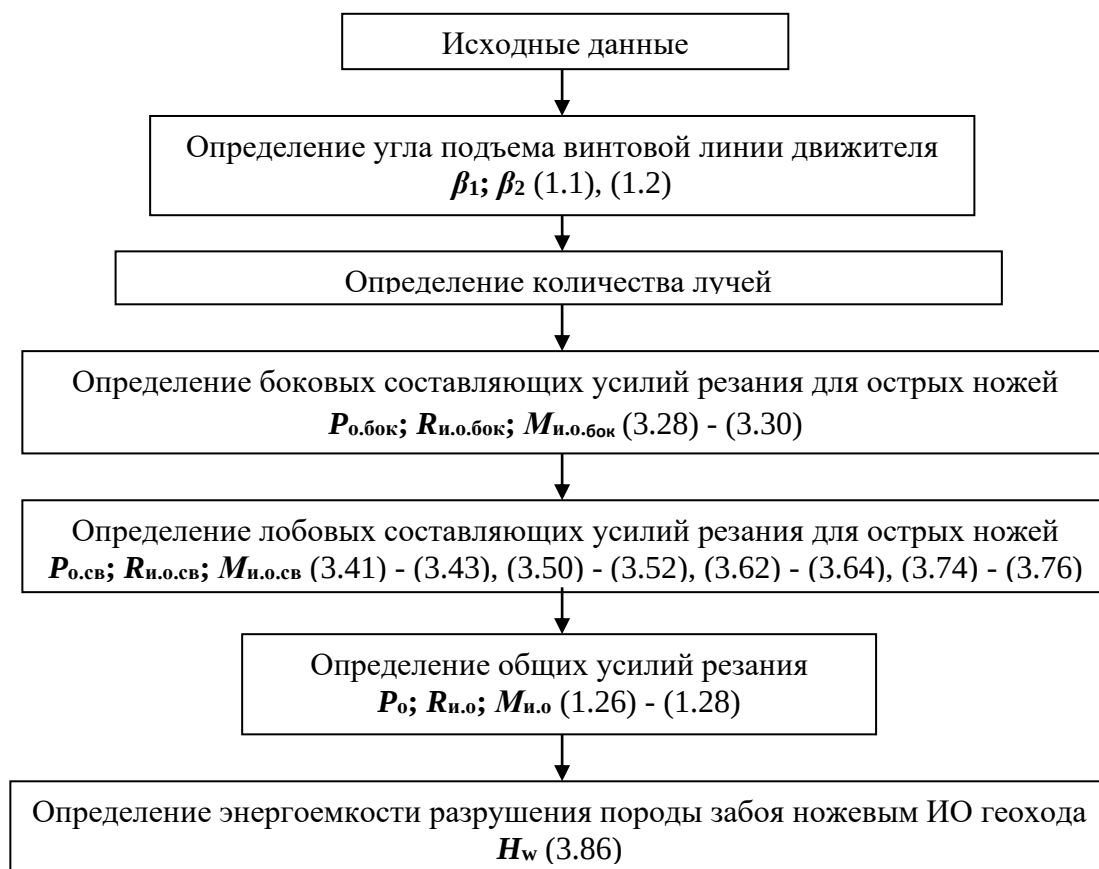


Рисунок 5.1 – Порядок определения силовых и энергетических параметров ножевого ИО геохода

Таблица 5.1 – Исходные данные для определения силовых и энергетических параметров ножевого исполнительного органа геохода

Параметр	Единица измерения	Обозначение
Геометрические параметры геохода		
Диаметр геохода	м	D_{Γ}
Шаг внешнего движителя	м	$h_{\text{в}}$
Угол резания	град	δ
Параметры геосреды		
Удельная сила резания в лобовой части прорези при угле резания 45°	Н/м ²	$m_{\text{св}}$
Сила разрушения грунта в боковых частях прорези	Н/м ²	$m_{\text{бок}}$

Параметр	Единица измерения	Обозначение
Удельная сила среза одним из боковых ребер ножа	Н/м	$m_{бок.ср}$
Угол трения	град	$\varphi_{тр}$
Коэффициент глубины расширяющей части прорези		$k_{бок}$
Угол наклона расширяющей части прорези к горизонту	град	$\gamma_{пр}$
Коэффициент, учитывающий влияние угла резания		φ

3) Определение количества лучей.

Количество лучей n принимают наибольшим в интервале от 2 до 8 шт., учитывая габаритные размеры геолога и конструктивную возможность расположения ножей.

4) Определение боковых составляющих усилий резания для острых ножей.

Проекция составляющей силы сопротивления резанию, независимой от ширины среза, на ось вращения геолога и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей определяются из выражений (3.28) - (3.30).

5) Определение лобовых составляющих усилий резания для острых ножей.

Проекция составляющей силы сопротивления резанию, зависящей от ширины среза, на ось вращения геолога и плоскость, перпендикулярную оси вращения, а также момент сопротивления резанию от этой составляющей при прямой, наклонной, полувыпуклой и выпуклой формах режущей кромки ножа определяются из выражений:

- (3.41) - (3.43) при прямой форме режущей кромки ножа;
- (3.50) - (3.52) при наклонной форме режущей кромки ножа;
- (3.62) - (3.64) при полувыпуклой форме режущей кромки ножа;
- (3.74) - (3.76) при выпуклой форме режущей кромки ножа.

6) Определение общих усилий резания.

Общие усилия определяются из выражений (1.26) - (1.28).

7) Определение энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геолога.

Энергоемкость разрушения породы забоя ножевым ИО геохода определяется по выражению (3.86).

Разработанная методика позволяет определять силовые и энергетические параметры ножевого ИО геохода.

5.2 Формирование исходных данных

Целью разрабатываемого образца геохода является демонстрация движения подземного аппарата в геосреде с использованием геосреды. Демонстрация накладывает ряд ограничений:

- размеры помещения для демонстрации;
- размеры стенда;
- параметры геосреды;
- ограниченность внутреннего пространства в демонстрационном образце геохода, для установки элементов привода и погрузочной системы.

Помещением для демонстрации выбран цех ООО «Стройиндустрия». Адрес местонахождения ООО «Стройиндустрия» 650021, г. Кемерово, ул. Западный проезд, дом 9-Б к1 (Рисунок 5.2).

Цех (Рисунок 5.3) оборудован мостовым краном, обеспечен подачей сжатого воздуха давлением до 5 атм., установлено освещение.

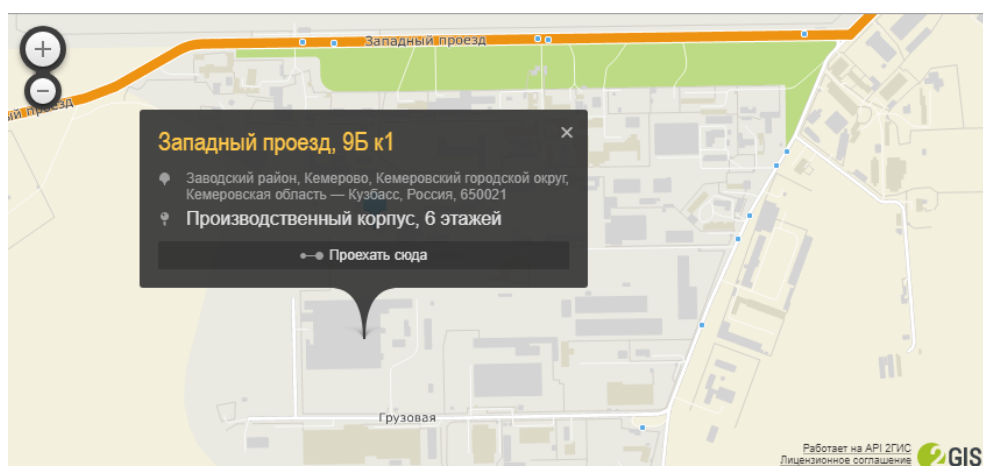


Рисунок 5.2 – Цех для демонстрации



Рисунок 5.3 – Цех для демонстрации

Завод ООО «Стройиндустрия» является производителем железобетонных изделий промышленного и гражданского назначения. Для изготовления демонстрационного стенда выбраны стандартные изделия, выпускаемые заводом. Исходя, из возможности сбора стенда и массово-габаритных характеристик изделий приняты фундаментные блоки ГОСТ 13579-78 (ФБС) размером 2380x500x580 мм. С учетом стесненных условий в цеху, условий доступности обслуживания, видимости внутреннего пространства демонстрационного образца геохода и размеров ФБС разработана схема стенда (Рисунок 5.4).

По разработанной схеме собран стенд в цеху (Рисунок 5.5).

Для демонстрации движения геохода в геосреде, необходима сама геосреда. ООО «Стройиндустрия» производит железобетонные изделия, для изготовления которых используется песок и другие сыпучие материалы. В качестве геосреды выбран речной песок. Параметры песка приведены в таблице 5.2.

Исходя из размеров стенда, предварительно диаметр демонстрационного образца геохода принят 0,6 м.

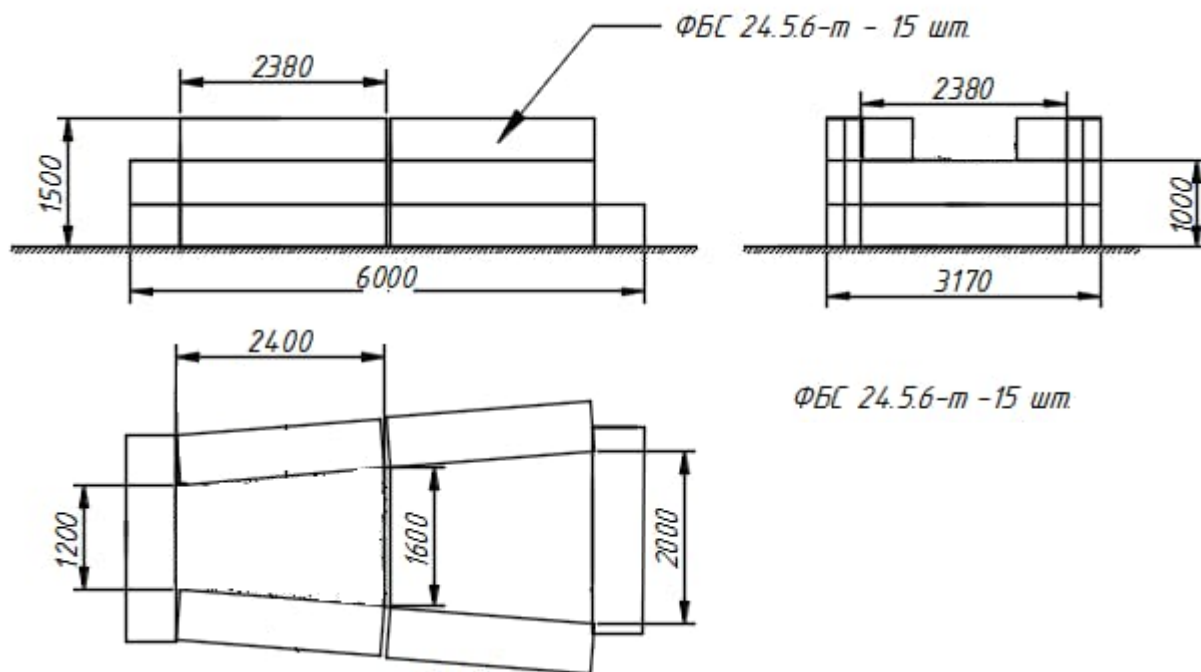


Рисунок 5.4 – Схема демонстрационного стенда



Рисунок 5.5 – Демонстрационный стенд

Таблица 5.2 – Параметры речного песка

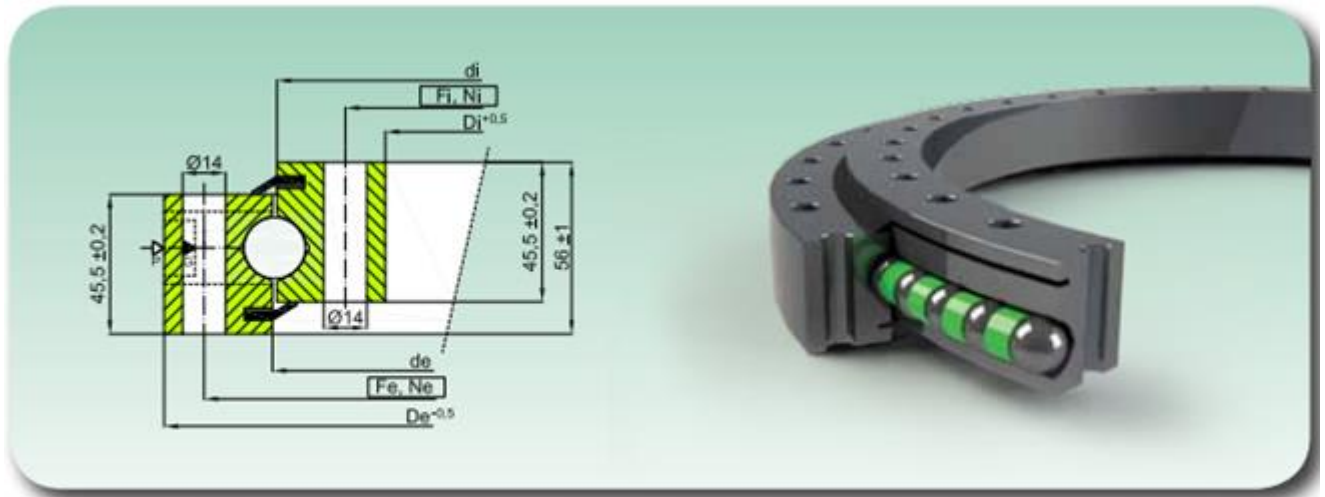
Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Плотность	ρ	кг/м ³	1,5
Удельная сила резания в лобовой части прорези при угле резания 45°	$m_{св}$	Н/м ²	31000
Сила разрушения в боковых частях прорези	$m_{бок}$	Н/м ²	9000
Удельная сила среза одним из боковых ребер ножа	$m_{бок.ср}$	Н/м	740
Угол трения	$\varphi_{тр}$	град	31,4
Коэффициент глубины расширяющей части прорези	$k_{бок}$		0,9
Угол наклона расширяющей части прорези к горизонту	$\gamma_{пр}$	град	30

Конструкция демонстрационного образца принята близкой техническому решению геохода с изгибающимся корпусом [28]. В конструкции тягового модуля принято решение использовать опорно-поворотные устройства (ОПУ). В ходе анализа типоразмеров ОПУ (Рисунок 5.6) выбрано ОПУ с параметрами, представленными в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Параметры ОПУ

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Внешний диаметр	De	мм	616
Внутренний диаметр	Di	мм	472
Ширина		мм	56
Материал			C45 Q+T
Масса		кг	37

Далее производится расчет требуемого вращающего момента приводного двигателя геохода, с учетом возможности расположения его внутри демонстрационного образца геохода.



Code Код	Kurve Кривая	Abmessungen Размеры				Befestigungslöcher Крепежные отверстия				Gewicht Масса
		De [mm]	de [mm]	di [mm]	Di [mm]	Fe [mm]	Ne [-]	Fi [mm]	Ni [-]	
NB1.20.0314.200-1PPN	1	386	315,5	312,5	242	360	20	268	20	21
NB1.20.0414.200-1PPN	2	486	415,5	412,5	342	460	24	368	24	29
NB1.20.0544.200-1PPN	3	616	545,5	542,5	472	590	32	498	32	37
NB1.20.0644.200-1PPN	4	716	645,5	642,5	572	690	36	598	36	44
NB1.20.0744.200-1PPN	5	816	745,5	742,5	672	790	40	698	40	52
NB1.20.0844.200-1PPN	6	916	845,5	842,5	772	890	40	798	40	59
NB1.20.0944.200-1PPN	7	1016	945,5	942,5	872	990	44	898	44	66
NB1.20.1094.200-1PPN	8	1166	1095,5	1092,5	1022	1140	48	1048	48	77

- Werkstoff: C45Q+T
 - Max. Axialluft 0,35 mm - Max. Radialluft 0,25 mm
 - Mit Fettfüllung, ölgeschützt und in beständige Plastikfolie eingewickelt
 - Material: C45 Q+T
 - Осевой зазор макс. 0,35 мм - Радиальный зазор макс. 0,25 мм
 - Заполненные смазкой, защищенные маслом, и обмотанные прочной пластиковой пленкой

▷ P=Kugelfüllstopfen / пробка ввода шариков ▷ G= 4 Schmierlöcher M8X1 / масленки M8X1 - 4 шт.

Рисунок 5.6 – Типоразмеры ОПУ

Расчет требуемого вращающего момента приводного двигателя геохода производится по выражению [111]:

$$M_{BP} = \frac{\left(M_{новд} - M_{ио} + M_{гм} + T_{об}^{BP} \cdot r_g \cdot \cos \beta + \right. \\ \left. + (R_{иоэпп} + T_{об}^{HBP} + G_{HBP} \cdot \sin \alpha) \cdot f_{ТП1} \cdot r_{КСП} - \sum P \cdot k_1 \right) \cdot \left(r_g + \frac{h_{эп}}{2} \right)}{k_2}, \quad (5.1)$$

где $M_{новд}$ – вращающий момент сопротивления резанию на исполнительном органе внешнего движителей, Н·м;

$M_{ио}$ – вращающий момент сопротивления резанию на исполнительном органе главного забоя, Н·м;

$M_{ГМ}$ – вращающий момент, необходимый для перемещения разрушенной породы из нижней части геохода вверх, Н·м;

$T_{ОБ}^{BP}$ – суммарные силы трения оболочек вращающейся части корпуса геохода об вмещающую породу, Н;

$r_{Г}$ – радиус геохода (по оболочке), м;

β – угол подъёма внешнего движителя, град;

$R_{ИОЭПН}$ – суммарные нормальных составляющих усилий внедрения элементов противовращения в приконтурный массив при движении геохода, Н;

$T_{ОБ}^{HBP}$ – суммарные силы трения оболочек не вращающейся части корпуса геохода об вмещающую породу, Н;

G_{HBP} – силы тяжести, действующие на не вращающуюся часть корпуса геохода, м;

α – угол подъёма выработки, град;

$f_{ТП1}$ – коэффициент трения стали по стали;

$r_{КСР}$ – средний радиус на кольце контакта элементов для передачи тягового усилия, м;

$$k_1 = \frac{\left(r_{Г} + \frac{h_{ВД}}{2} \right) \cdot (\sin \beta - f_{ТП} \cdot \cos \beta)}{\cos \beta - f_{ТП} \cdot \sin \beta}, \quad (5.2)$$

$$k_2 = f_{ТП} \cdot k_1 - f_{ТП} \cdot f_{ТП1} \cdot r_{КСР} + r_{Г} + \frac{h_{ЭП}}{2}, \quad (5.3)$$

$$\sum P = R_O + R_{ИОВДН} \cdot \sin \beta + (G_{BP} + G_{HBP}) \cdot \sin \alpha + T_{ОБ}^{BP} \cdot \sin \beta + R_{ИОЭПН} + T_{ОБ}^{HBP} \quad (5.4)$$

$f_{ТП}$ – коэффициент трения стали по породе в условиях сухого трения.

$h_{ЭП}$ – высота элементов противовращения геохода, м;

$h_{ВД}$ – высота элементов внешнего движителя геохода, м.

Для расчета требуемого вращающего момента приводного двигателя геохода необходимо определить вращающий момент сопротивления резанию на исполнительном органе главного забоя и суммарные нормальных составляющих

усилий внедрения элементов противовращения в приконтурный массив при движении геохода.

Параметры геосреды представлены в таблице 5.2. Предварительные параметры геохода представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Параметры геохода для предварительного расчета

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Радиус геохода	r_{Γ}	м	0,3
Шаг внешнего движителя	h_B	м	0,3
Ширина резания ИО ВД	b'	м	0,001
Глубина резания ИО ВД	t	м	0,1
Ширина резания ИО ЭП	$b^{эп}$	м	0,001
Глубина резания ИО ЭП	$h^{эп}$	м	0,2

В четвертой главе обоснованно, что 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%.

Таким образом, для предварительного расчета вращающего момента сопротивления резанию на исполнительном органе главного забоя принята выпуклая форма режущей кромки ножа.

Предварительный расчет вращающего момента сопротивления резанию на исполнительном органе главного забоя производится по методике, представленной на рисунке 5.1.

1) Определение угла подъема винтовой линии движителя (1.1), (1.2):

$$\beta_1 = \operatorname{arctg} \frac{h_B}{2\pi R_z} = \operatorname{arctg} \frac{0,3}{2\pi \cdot 0,3} = 9,04^\circ.$$

$$\beta_2 = \operatorname{arctg} \frac{h_B}{2\pi R_o} = \operatorname{arctg} \frac{0,3}{2\pi \cdot 0,05} = 43,7^\circ.$$

2) Определение количества лучей.

Количество лучей n для предварительного расчета принимаем 4 шт.

3) Определение боковых составляющих усилий резания для острых ножей
(3.28) - (3.30):

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

$$= \frac{0,3}{4} \left(9000 \frac{0,3}{4} \cos 9,04 + 740 \right) \left[\frac{\sin(2 \cdot 9,04)}{2} - ctg(30 + 31,4) \cos^2 9,04 \right] + \frac{0,3}{4} \times$$

$$\times \left(9000 \frac{0,3}{4} \cos 43,7 + 740 \right) \left[\frac{\sin(2 \cdot 43,7)}{2} - ctg(30 + 31,4) \cos^2 43,7 \right] = -19,9 \text{ Н} ;$$

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

$$= \frac{0,3}{4} \left(36000 \frac{0,3}{4} \cos 9,04 + 8490 \right) \left[\cos^2 9,04 + ctg(30 + 31,4) \frac{\sin(2 \cdot 9,04)}{2} \right] +$$

$$+ \frac{0,3}{4} \left(36000 \frac{0,3}{4} \cos 43,7 + 8490 \right) \left[\cos^2 43,7 + ctg(30 + 31,4) \frac{\sin(2 \cdot 43,7)}{2} \right] = 144,7 \text{ Н} ;$$

$$M_{u.o.бок} = \frac{h_B r_z}{n} \left(m_{бок} \frac{h_B}{n} \cos \beta_1 + m_{бок.ср} \right) \left(\cos^2 \beta_1 + ctg(\delta + \phi_{mp}) \frac{\sin 2\beta_1}{2} \right) +$$

$$+ \frac{h_B r_o}{n} \left(m_{бок} \frac{h_B}{n} \cos \beta_2 + m_{бок.ср} \right) \left(\cos^2 \beta_2 + ctg(\delta + \phi_{mp}) \frac{\sin 2\beta_2}{2} \right) =$$

$$= \frac{0,3 \cdot 0,3}{4} \left(9000 \frac{0,3}{4} \cos 9,04 + 740 \right) \left[\cos^2 9,04 + ctg(30 + 31,4) \frac{\sin(2 \cdot 9,04)}{2} \right] +$$

$$+ \frac{0,3 \cdot 0,05}{4} \left(9000 \frac{0,3}{4} \cos 43,7 + 740 \right) \left[\cos^2 43,7 + ctg(30 + 31,4) \frac{\sin(2 \cdot 43,7)}{2} \right] = 25,4 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

4) Определение лобовых составляющих усилий резания для острых ножей
(3.74) - (3.76):

$$\begin{aligned}
P_{o.c\theta} &= \phi m_{c\theta} \frac{h_{\theta}}{r_{kp} n} \left(\frac{h_{\theta}}{2\pi} \ln \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) - ctg(\delta + \phi_{TP}) \left(\frac{r_z - r_o}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left(r_{kp}^2 + \frac{h_{\theta}^2}{2\pi^2} \right) \arcsin \left(\frac{r_z - r_o}{2r_{kp}} \right) - \frac{h_{\theta}}{\pi} r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{h_{\theta}}{2\pi r_{kp}} \right)^2} \arctg \left(\frac{\pi(r_z - r_o) \sqrt{r_{kp}^2 + \left(\frac{h_{\theta}}{2\pi} \right)^2}}{h_{\theta} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2}} \right) \right) \right) = \\
&= 0,59 \cdot 31000 \frac{0,3^2}{0,2 \cdot 4} \ln \left(\frac{\sin 43,7}{\sin 9,04} \right) - ctg(30 + 31,4) \cdot 0,59 \cdot 31000 \frac{0,3}{0,2 \cdot 4} \left(\frac{0,3 - 0,05}{2} \times \right. \\
&\quad \times \sqrt{0,2^2 - \left(\frac{0,3 - 0,05}{2} \right)^2} + \left(0,2^2 + \frac{0,3^2}{2\pi^2} \right) \arcsin \left(\frac{0,3 - 0,05}{2 \cdot 0,2} \right) - \frac{0,3}{\pi} 0,2 \sqrt{1 + \left(\frac{0,3}{2\pi \cdot 0,2} \right)^2} \times \\
&\quad \left. \times \arctg \left(\frac{\pi(0,3 - 0,05) \sqrt{0,2^2 + \left(\frac{0,3}{2\pi} \right)^2}}{0,3 \sqrt{0,2^2 - \left(\frac{0,3 - 0,05}{2} \right)^2}} \right) \right) = 15H;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_{u.o.c\theta} &= \phi m_{c\theta} \frac{h_{\theta}}{n} \left(\left(r_z - r_o + \frac{h_{\theta}}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) + ctg(\delta + \phi_{TP}) \frac{h_{\theta}}{2\pi r_{kp}} \times \right. \\
&\quad \times \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right) \sqrt{r_{kp}^2 + \frac{h_{\theta}^2}{2\pi^2}} \ln \left(\frac{\left(\left(\frac{r_z - r_o}{2} \right) \sqrt{r_{kp}^2 + \frac{h_{\theta}^2}{2\pi^2}} + \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} \right)}{\left(\left(-\frac{r_z - r_o}{2} \right) \sqrt{r_{kp}^2 + \frac{h_{\theta}^2}{2\pi^2}} + \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} \right)} \right) \right) = \\
&= 0,59 \cdot 31000 \frac{0,3}{4} \left(0,3 - 0,05 + \frac{0,3}{2\pi} (9,04 - 43,7) \right) + ctg(30 + 31,4) \times \\
&\quad \times 0,59 \cdot 31000 \frac{0,3^2}{2\pi \cdot 0,2 \cdot 4} \left(\frac{0,3 - 0,05}{2} \right) \sqrt{0,2^2 + \frac{0,3^2}{2\pi^2}} \times \\
&\quad \times \ln \left(\frac{\left(\left(\frac{0,3 - 0,05}{2} \right) \sqrt{0,2^2 + \frac{0,3^2}{2\pi^2}} + \sqrt{0,2^2 - \left(\frac{0,3 - 0,05}{2} \right)^2} \right)}{\left(\left(-\frac{0,3 - 0,05}{2} \right) \sqrt{0,2^2 + \frac{0,3^2}{2\pi^2}} + \sqrt{0,2^2 - \left(\frac{0,3 - 0,05}{2} \right)^2} \right)} \right) = 303,3H;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{u.o.св} &= \phi m_{св} \frac{h_{\theta}^2}{2\pi r_{kp} n} \left(\frac{h_{\theta}}{2\pi} \left(\frac{\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1}{2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_2} + \ln \left(\frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \right) \right) + \frac{ctg(\delta + \phi_{TP})}{r_{kp}} \times \right. \\
&\times \left(\frac{r_z - r_o}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} + 2 \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + \left(\frac{h_{\theta}}{2\pi} \right)^2 \right) \arcsin \left(\frac{r_z - r_o}{2r_{kp}} \right) - \right. \\
&\left. \left. - \frac{h_{\theta}}{\pi} r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{h_{\theta}}{2\pi r_{kp}} \right)^2} \arctg \left(\frac{\pi (r_z - r_o) \sqrt{r_{kp}^2 + \left(\frac{h_{\theta}}{2\pi} \right)^2}}{h_{\theta} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2}} \right) \right) \right) = \\
&= 0,59 \cdot 31000 \frac{0,3^3}{4\pi^2 \cdot 4} \left(\frac{\sin^2 43,7 - \sin^2 9,04}{2 \sin^2 9,04 \sin^2 43,7} + \ln \left(\frac{\sin 9,04}{\sin 43,7} \right) \right) + ctg(30 + 31,4) \cdot 0,59 \cdot 31000 \times \\
&\times \frac{0,3^2}{2\pi \cdot 0,2 \cdot 4} \times \left(\frac{0,3 - 0,05}{2} \sqrt{0,2^2 - \left(\frac{0,3 - 0,05}{2} \right)^2} + 2 \left(\frac{0,2^2}{2} + \left(\frac{0,3}{2\pi} \right)^2 \right) \arcsin \left(\frac{0,3 - 0,05}{2 \cdot 0,2} \right) - \right. \\
&\left. - \frac{0,3}{\pi} 0,2 \sqrt{1 + \left(\frac{0,3}{2\pi \cdot 0,2} \right)^2} \arctg \left(\frac{\pi (0,3 - 0,05) \sqrt{0,2^2 + \left(\frac{0,3}{2\pi} \right)^2}}{0,3 \sqrt{0,2^2 - \left(\frac{0,3 - 0,05}{2} \right)^2}} \right) \right) = 68,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.
\end{aligned}$$

5) Определение общих усилий резания (1.26) - (1.28):

$$P_o = n(P_{o.св} + P_{бок}) = 4(-19,9 + 15) = -24,5 \text{ Н};$$

$$R_{u.o} = n(R_{u.o.св} + R_{u.o.бок}) = 4(144,7 + 303,3) = 1792 \text{ Н};$$

$$M_{u.o} = n(M_{u.o.св} + M_{u.o.бок}) = 4(25,4 + 68,6) = 376 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6) Определение энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО ге-
охода (3.86):

$$\begin{aligned}
H_w &= \frac{R_{u.o.св} + R_{u.o.бок}}{\frac{h_{\theta}^2}{2n^2} \left(\frac{\sin \beta_2 - \sin \beta_1}{\pi \sin \beta_1 \sin \beta_2} + \frac{k_{бок}^2}{n} ctg \gamma (\cos^2 \beta_1 + \cos^2 \beta_2) \right)} \\
&= \frac{144,9 + 303,3}{\frac{0,3^2 (\sin 43,7 - \sin 9,04)}{2\pi \cdot 4 \sin 9,04 \sin 43,7} + 0,9^2 \frac{0,3^2}{2 \cdot 4^2} ctg 30 (\cos^2 9,04 + \cos^2 43,7)} = 11 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3.
\end{aligned}$$

Предварительные значения требуемых силовых и энергетических параметров представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Требуемые силовые и энергетические параметры ИО демонстрационного образца геохода

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Формула	Значение
Проекция составляющей силы сопротивления резанию, независимая от ширины среза, на ось вращения геохода	$P_{o.бок}$	Н	3.28	-19,9
Проекция составляющей силы сопротивления резанию, независимая от ширины среза, на плоскость, перпендикулярную оси вращения	$R_{и.о.бок}$	Н	3.29	144,7
Момент сопротивления резанию, независимый от ширины среза	$M_{и.о.бок}$	Н·м	3.30	25,4
Проекция составляющей силы сопротивления резанию, зависящая от ширины среза, на ось вращения геохода	$P_{o.св}$	Н	3.74	15
Проекция составляющей силы сопротивления резанию, зависящая от ширины среза, на плоскость, перпендикулярную оси вращения	$R_{и.о.св}$	Н	3.75	303,3
Момент сопротивления резанию, зависящий от ширины среза	$M_{и.о.св}$	Н·м	3.76	68,6
Полная проекция силы сопротивления резанию на ось вращения геохода	P_o	Н	1.26	-24,5
Полная проекция силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения	$R_{и.о.}$	Н	1.27	1792
Полный момент сопротивления резанию	$M_{и.о.}$	Н·м	1.28	376
Энергоемкость разрушения породы забоя ножевым ИО геохода	H_w	кДж/м ³	3.86	11

Момент сопротивления резанию на исполнительном органе внешнего движителя (ИО ВД) по методике [51].

Момент сопротивления резанию для острого ножа ИО ВД [51]:

$$M_{и.о.}^e = M_{и.о.св}^e + M_{и.о.бок}^e . \quad (5.5)$$

$$M_{u.o.cв}^e = \phi m_{св} b' t \left(r_z + \frac{t}{2} \right) \cos \beta. \quad (5.6)$$

$$M_{u.o.бок}^e = 2t \cos \beta \left(r_z + \frac{t}{2} \right) (m_{бок} t + m_{бок.ср}). \quad (5.7)$$

где b' - ширина резания ИОВД, м; t - глубина резания ИОВД, м; β - угол наклона винтовой лопасти, град; $\left(r_z + \frac{t}{2} \right)$ - расстояние от центра вращения геохода до точки приложения силы $P_{св}^e$, м.

$$M_{u.o.cв}^e = \phi m_{св} b' t \left(r_z + \frac{t}{2} \right) \cos \beta = 0,59 \cdot 31000 \cdot 0,001 \cdot 0,1 \cdot \left(0,3 + \frac{0,1}{2} \right) \cos 9,04 = 0,63 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{u.o.бок}^e = 2t \cos \beta \left(r_z + \frac{t}{2} \right) (m_{бок} t + m_{бок.ср}) = 2 \cdot 0,1 \cdot \cos 9,04 \left(0,3 + \frac{0,1}{2} \right) (9000 \cdot 0,1 + 740) = 113,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{u.o.}^e = M_{u.o.cв}^e + M_{u.o.бок}^e = 0,63 + 113,4 = 114,03 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Суммарные нормальных составляющих усилий внедрения элементов противовращения в приконтурный массив при движении геохода определяется по выражению 1.15:

$$\begin{aligned} P_{ср}^{эн} &= \phi m_{св} b'^{эн} h^{эн} + 2m_{бок} h^{эн2} + 2m_{бок.ср} h^{эн} = \\ &= 0,59 \cdot 31000 \cdot 0,001 \cdot 0,2 + 2 \cdot 9000 \cdot 0,2^2 + 2 \cdot 740 \cdot 0,2 = 1041,6 \text{ Н} \end{aligned}$$

Полученные значения предварительных требуемых силовых параметров используются при расчете требуемого вращающего момента приводного двигателя геохода. Расчет производится по выражению (5.1) в среде Mathcad.

Результатом расчета является предварительное значение требуемого вращающего момента приводного двигателя геохода, которое равно 1053,8 Н·м.

В таблице 5.6 приведены электродвигатели, удовлетворяющие требуемому вращающему моменту приводного двигателя геохода.

Таблица 5.6 – Характеристики электродвигателей

Параметр	Электродвигатель			
	Мотор-редуктор SPN01L4MC	Мотор-редуктор SPN06L4MC	Мотор-редуктор 307L4	Мотор-редуктор MPB -300
Крутящий момент на выходе, Н·м	1149	4870	3688	5300
Мощность электродвигателя, кВт	0,25	0,25	0,25	0,37
Передаточное отношение редуктора	755	2916	2208	2033
Число оборотов на выходе, об/мин	1,8	0,49	0,57	0,33
Габаритная ширина, м	0,2055	0,292	0,374	0,350
Длина, м	0,5975	783,5	0,653	0,906
Масса, кг	42	95	85	113

Окончательно двигатель принимается по массово-габаритным характеристикам: наименьшая масса и наименьшие габаритные размеры. В результате, принят мотор-редуктор SPN01L4MC (рис.5.7).

Для передачи крутящего момента на вращающийся (наружный) корпус тягового модуля разработана цевочная передача с промежуточными звездочками (Рисунок 5.8).

Достоинства цевочного зацепления:

- отсутствие жестких требований к точности;
- возможность загрязнения передачи;
- простота изготовления.

Характеристики цевочной передачи с промежуточными звездочками приведены в таблице 5.7.

Взаимосвязь мотор-редуктора, цевочной передачи и ИО главного забоя, обеспечивает встречное направление вращения ИО главного забоя и вращающегося корпуса тягового модуля. Частоты вращения ИО главного забоя и вращающегося корпуса тягового модуля отличаются по значению.

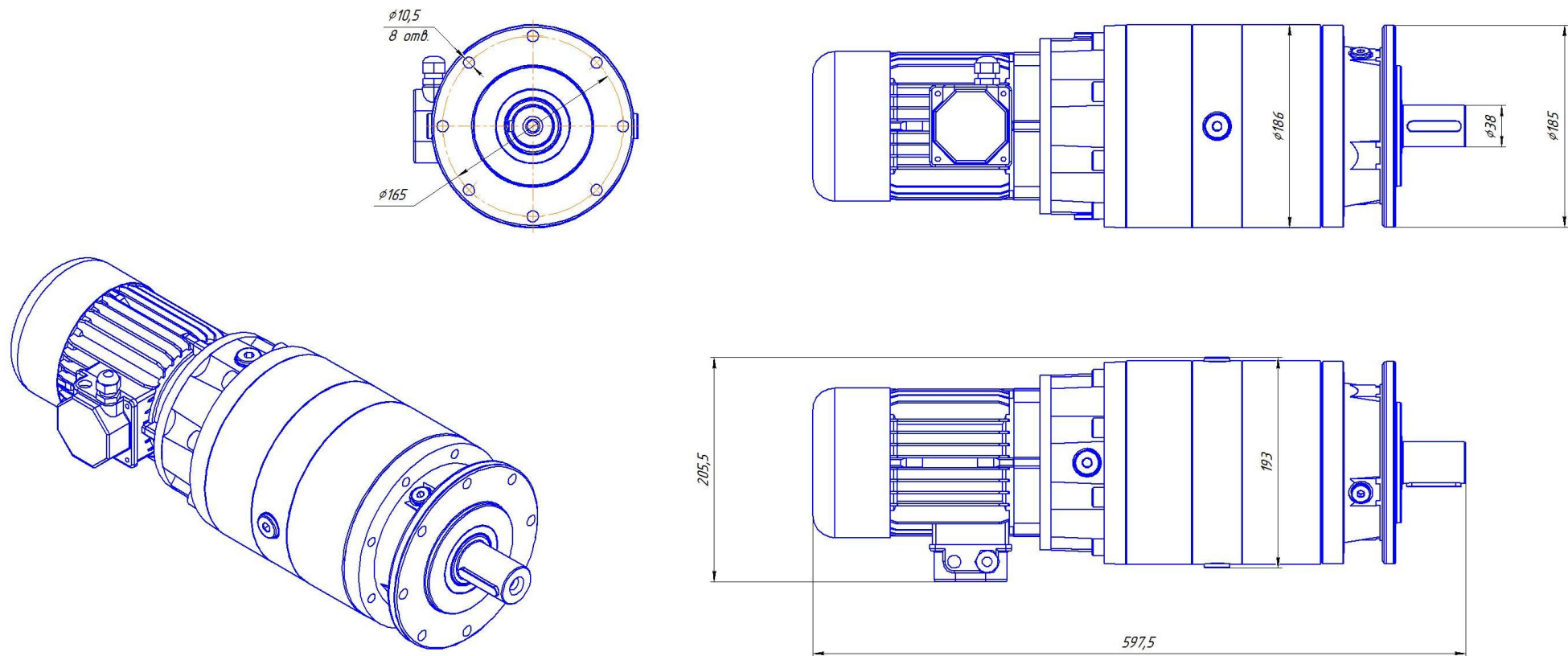


Рисунок 5.7 – Планетарный мотор-редуктор SPN01L4MC

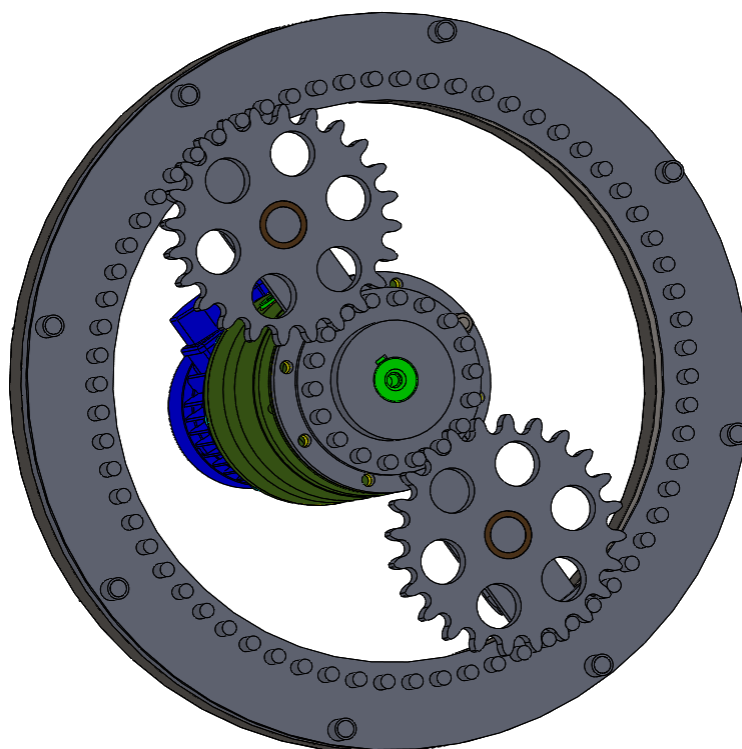


Рисунок 5.8 – Цевочная передача с двумя промежуточными звездочками

Таблица 5.7 – Характеристики цевочной передачи с двумя промежуточными звездочками

Параметр	Значение
Момент на подвижном корпусе, Нм	2000
Количество паразитных колес	2
Момент на одной передаче, Нм	1000
Передаточное отношение	3,67
Диаметр цевки, мм	12
Число цевок колеса	66
Диаметр колеса, мм	504,203
Число зубьев паразитной звездочки	24
Делительный диаметр паразитной звездочки, мм	183,346
Число зубьев звездочки	18
Делительный диаметр звездочки, мм	137,51
Ширина звездочки, мм	24
Расстояние между опорами цевок, мм	34

Для крепления лопасти внешнего движителя к ОПУ принято решение раз-
работать кожух (Рисунок 5.9).



Рисунок 5.9 – Кожух одного кольца тягового модуля

В ходе конструкторских проработок разработана 3D-модель ДО геохода, представленная на рисунке 5.10 и 5.11. Параметры ДО геохода, приведены в таблицах 5.8 и 5.9.

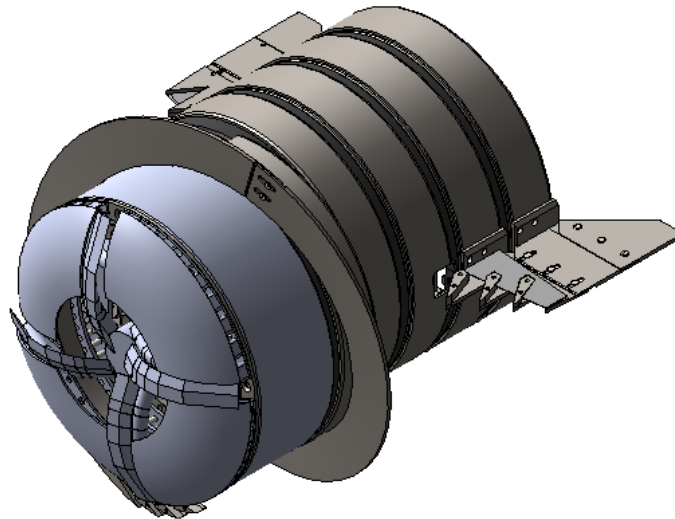
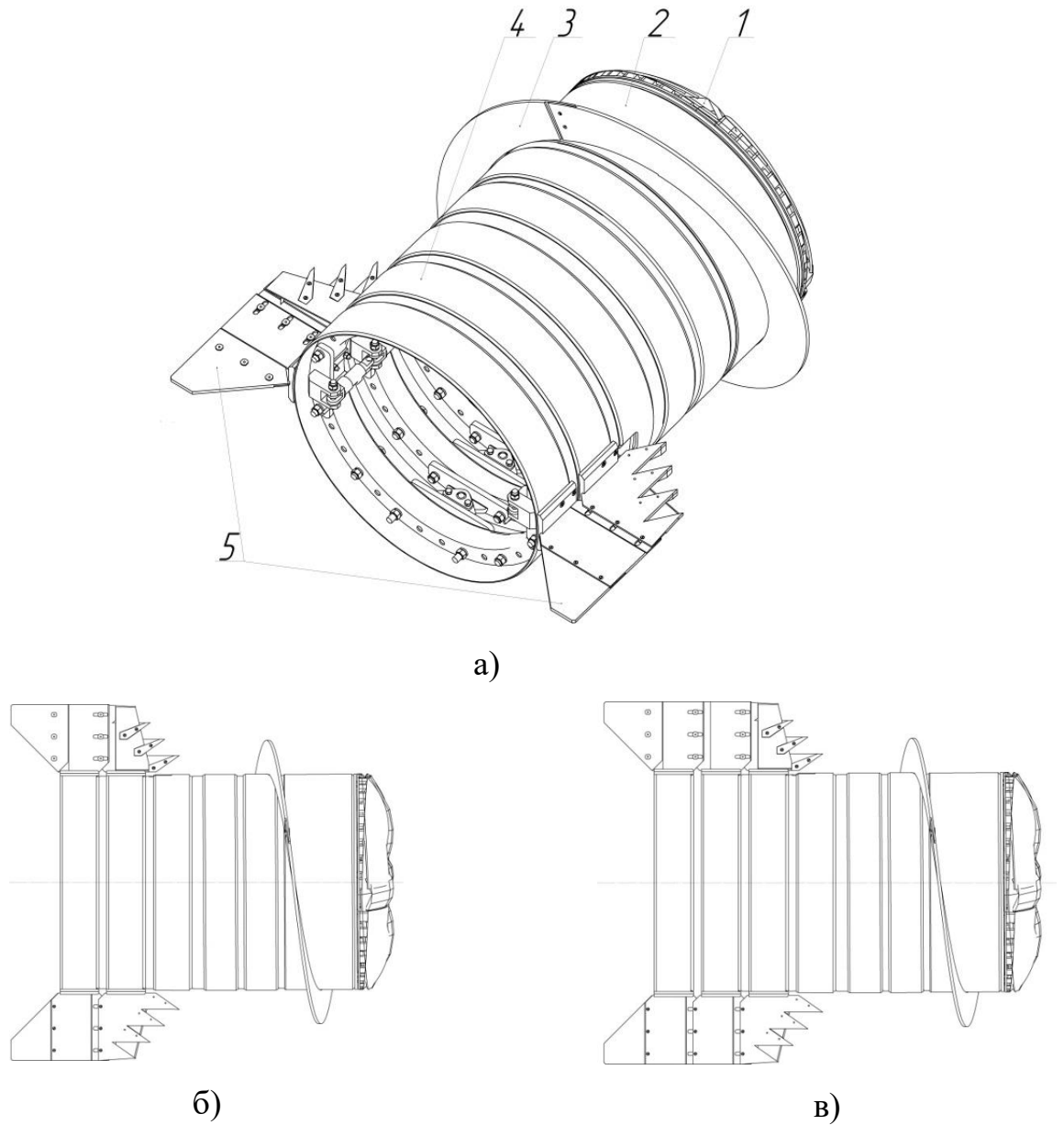


Рисунок 5.10 – 3D-модель ДО геохода

Исполнительный орган главного забоя (ИО ГЗ) (поз. 1 рисунка 5.11) состоит из основания, муфты, трубок (лучи), ножей центральной части, секторов и режущих ножей. Корпус тягового модуля ДО геохода (поз. 2 рисунка 5.11) состоит из нескольких стандартных опорно-поворотных устройств (ОПУ) последовательно

соединенных между собой, а также привода, состоящего из мотор-редуктора и цепочной передачи. Привод закреплен на внутренних кольцах ОПУ. Привод задает вращение внешним кольцам ОПУ и исполнительному органу главного забоя.



1 – исполнительный орган главного забоя; 2 – тяговый модуль; 3 – внешний движитель;

4 – опорный модуль; 5 – элементы противовращения

а) общий вид ДО МПАСВ (исполнение 1); б) главный вид ДО МПАСВ исполнение 1;

в) главный вид ДО МПАСВ исполнение 2

Рисунок 5.11 – ДО геохода

Также тяговый модуль оснащен внешним двигателем (поз. 3 рисунка 5.11) в виде лопасти, расположенной по винтовой линии. При вращении наружных колец ОПУ тяговый модуль осуществляет ввинчивание в геосреду, т.е. осуществляет вращательно-поступательное перемещение. Внутренние кольца ОПУ сопряжены с опорным модулем (поз. 4 рисунка 5.11), что позволяет вовлекать опорный модуль в поступательное перемещение вслед за тяговым. Опорный модуль оснащен элементами противовращения (ЭП) (поз. 5 рисунка 5.11), которые удерживают опорный модуль от вращения.

ДО геохода может быть выполнен в 2-х исполнениях (рисунок 5.11 б, в). Исполнение 2 геохода отличается удлиненным опорным модулем и ЭП, что обеспечивает большую площадь контакта ЭП с породой. Геометрические параметры ДО геохода представлены на рисунке 5.12. Общий вид привода ДО геохода представлен на рисунке 5.13. Основные параметры ДО геохода представлены в таблице 5.8. Параметры привода ДО геохода в таблице 5.9.

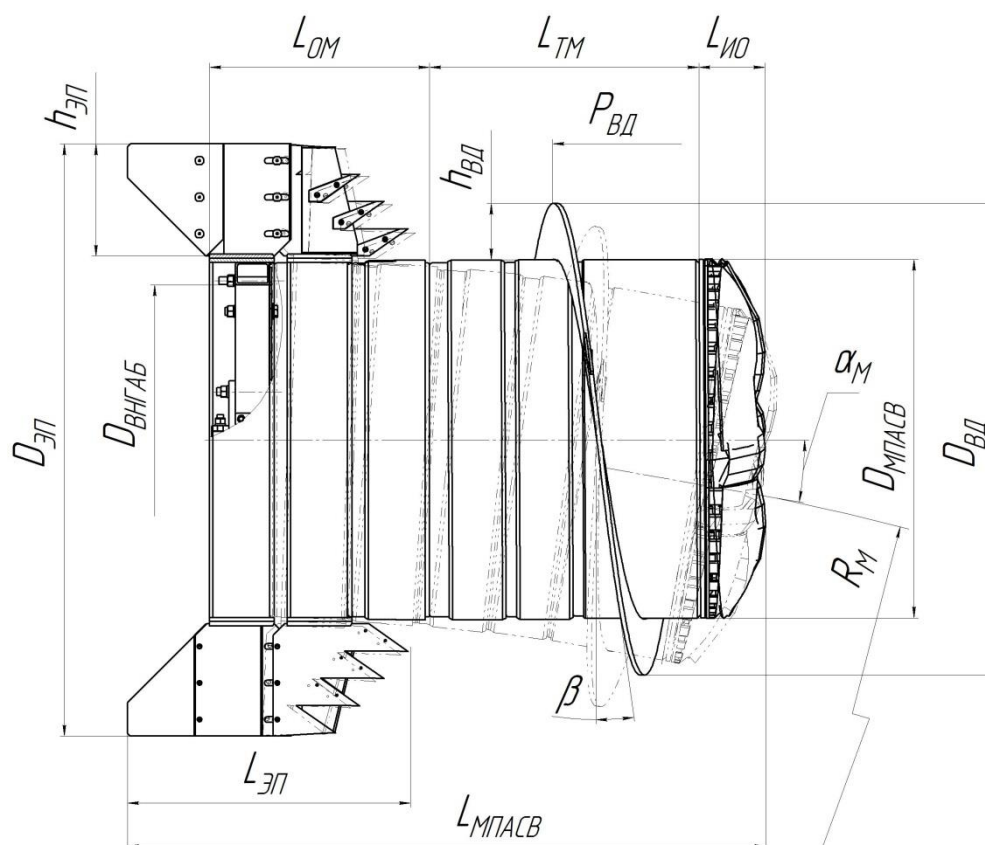


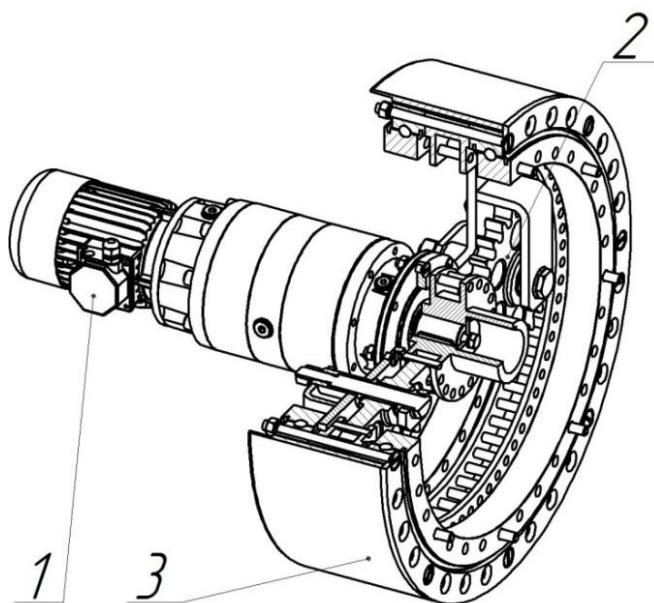
Рисунок 5.12 – Геометрические параметры ДО геохода

Таблица 5.8 – Основные параметры ДО геохода

№ п/п	Наименование характеристики		Обозначение, единицы измерения	Значение
Общие характеристики ДО геохода				
1.	Диаметр (по оболочке корпуса)		$D_{МПАСВ}$, м	0,64
2.	Диаметр (по ВД)		$D_{ВД}$, м	0,84
3.	Диаметр (по ЭП)		$D_{ЭП}$, м	1,054
4.	Общая длина	Исполнение 1	$L_{МПАСВ}$, м	1,135
		Исполнение 2		1,273
5.	Масса ДО геохода	Исполнение 1	$m_{МПАСВ}$, кг	586
		Исполнение 2		621
6.	Угол изгиба корпуса при повороте (угол маневрирования)	Исполнение 1	α_m , град	до 10°
		Исполнение 2		до 12°
7.	Радиус поворота (маневрирования)	Исполнение 1	R_m , град	от 4,9 м
		Исполнение 2		от 5,1 м
8.	Скорость проходки		$V_{П}$, м/час	до 8,82
Характеристики исполнительного органа				
9.	Тип исполнительного органа		-	ножевой
10.	Количество лучей исполнительного органа		шт	4
11.	Количество ножей на исполнительном органе		шт	25 (по 8 на 4-х лучах и один для подрезания центральной части забоя)
12.	Длина исполнительного органа (глубина забоя)		$L_{ио}$, м	0,096
13.	Скорость вращения исполнительного органа геохода		$\omega_{ио}$, об/мин	0..1,8
Характеристики внешнего движителя				
14.	Тип внешнего движителя		-	В виде лопасти, расположенной по винтовой линии
15.	Возможность замены внешнего движителя		-	Несъемный (крепление к оболочке тяго-

№ п/п	Наименование характеристики		Обозначение, единицы измерения	Значение
				вого модуля сваркой)
16.	Количество ножей на внешнем движителе для формирования канала		шт	4
17.	Высота внешнего движителя		h _{ВД} , м	0,1
18.	Шаг внешнего движителя (шаг винтовой линии ВД)		P _{ВД} , м	0,3
19.	Угол подъема винтовой линии внешнего движителя		β, град	6,49°
Характеристики тягового модуля				
20.	Тип конструкции корпуса тягового модуля		-	Составная из соединенных последовательно опорно-поворотных устройств
21.	Наименование опорно-поворотных устройств (ОПУ) корпуса тягового модуля		-	NB1.20.0544.200-1PPN ISB
22.	Тип ОПУ корпуса тягового модуля		-	Стандартная серия с одним рядом шариков
23.	Количество ОПУ корпуса тягового модуля		шт	4 (2 из них в составе привода)
24.	Длина тягового модуля		L _{ТМ} , м	0,457
25.	Диаметр габарита внутреннего пространства тягового модуля		D _{ВНГАБ} , м	0,434
26.	Скорость вращения внешней оболочки тягового модуля		ω _{МПАСВ} , об/мин	0..0,49
Характеристики опорного модуля				
27.	Тип конструкции корпуса опорного модуля		-	Составная из соединенных последовательно колец
28.	Количество колец корпуса опорного модуля	Исполнение 1	шт	3
		Исполнение 2		4
29.	Длина опорного модуля	Исполнение 1	L _{ОМ} , м	0,441
		Исполнение 2		0,588

№ п/п	Наименование характеристики	Обозначение, единицы измерения	Значение
30.	Диаметр габарита внутреннего пространства опорного модуля	$D_{\text{ВНГАБ}}, \text{ м}$	0,55
Характеристики элементов противовращения			
31.	Тип конструкции элементов противовращения	-	В виде составной из пластин лопасти
32.	Возможность замены элементов противовращения	-	Съемная конструкция (болтовое соединение)
33.	Количество элементов противовращения	шт	2
34.	Количество пластин элемента противовращения	Исполнение 1	шт
		Исполнение 2	шт
35.	Количество ножей на элементе противовращения для формирования канала	шт	4
36.	Длина элементов противовращения	Исполнение 1	$L_{\text{ЭП}}, \text{ м}$
		Исполнение 2	$L_{\text{ЭП}}, \text{ м}$
37.	Высота элементов противовращения	$h_{\text{ЭП}}, \text{ м}$	0,207
38.	Угол наклона элементов противовращения	$\gamma, \text{ град}$	8°



1 – мотор-редуктор; 2 – цевочная передача; 3 – кольцо корпуса тягового модуля

Рисунок 5.13 – Общий вид привода ДО геохода

Таблица 5.9 – Параметры привода ДО геохода

№ п/п	Наименование характеристики	Единицы измерения	Значение
Общие характеристики привода			
1.	Тип привода	-	Механический, с использованием покупного мотор-редуктора
2.	Тип передачи привода	-	цевочная
3.	Количество звездочек цевочной передачи привода	шт	2
4.	Передаточное число цевочной передачи привода	-	3,67
Характеристики мотор-редуктора			
5.	Наименование мотор-редуктора	-	SPN01 L4-755-1,8-0,25кВт(XRMS)-MC-A
6.	Возможность замены двигателя мотор-редуктора	-	Возможна замена двигателя или вращение входного вала редуктора в ручном режиме
7.	Тип редуктора	-	планетарный
8.	Тип двигателя	-	электрический асинхронный
9.	Передаточное число редуктора	-	755
10.	Число оборотов на выходе редуктора	об/мин	1,8
11.	Крутящий момент на выходе редуктора	Н·м	до 1149
12.	Мощность электродвигателя	кВт	0,25
13.	Массамотор-редуктора	кг	4,2
14.	Сервис-фактормотор-редуктора	-	1,9
15.	КПД мотор-редуктора	-	0,88

5.3 Расчет требуемых силовых и энергетических параметров ножевого исполнительного органа демонстрационного образца геохода

Исходя из полученных массогабаритных характеристик, проводится уточнение силовых и энергетических параметров ДО геохода.

Частота вращения ИО главного забоя больше вращения внешнего движителя в 3,67 раза (передаточное число цевочной передачи). Следовательно, шаг внешнего движителя приходящий на ИО геохода будет в 3,67 раза меньше:

$$h'_s = \frac{h_s}{3,67} = \frac{0,3}{3,67} = 0,082 \text{ м}$$

1) Определение угла подъема винтовой линии движителя (1.1), (1.2):

$$\beta_1 = \arctg \frac{h_B}{2\pi R_s} = \arctg \frac{0,082}{2\pi \cdot 0,32} = 2,33^\circ.$$

$$\beta_2 = \arctg \frac{h_B}{2\pi R_o} = \arctg \frac{0,082}{2\pi \cdot 0,05} = 14,6^\circ.$$

2) Определение количества лучей.

Количество лучей n принимаем 4 шт.

3) Определение боковых составляющих усилий резания для острых ножей (3.28) - (3.30):

$$\begin{aligned} P_{o.бок} &= \frac{h_B}{n} \sum_{i=1}^2 \left(m_{бок} \frac{h_B}{n} \cos \beta_i + m_{бок.ср} \right) \left(\frac{\sin 2\beta_i}{2} - \operatorname{ctg}(\delta + \phi_{mp}) \cos^2 \beta_i \right) = \\ &= \frac{0,082}{4} \left(9000 \frac{0,082}{4} \cos 2,33 + 740 \right) \left[\frac{\sin(2 \cdot 2,33)}{2} - \operatorname{ctg}(30 + 31,4) \cos^2 2,33 \right] + \frac{0,082}{4} \times \\ &\times \left(9000 \frac{0,082}{4} \cos 14,6 + 740 \right) \left[\frac{\sin(2 \cdot 14,6)}{2} - \operatorname{ctg}(30 + 31,4) \cos^2 14,6 \right] = -14,6 \text{ Н}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{u.o.бок} &= \frac{h_B}{n} \sum_{i=2}^2 \left(m_{бок} \frac{h_B}{n} \cos \beta_i + m_{бок.ср} \right) \left(\cos^2 \beta_i + \operatorname{ctg}(\delta + \phi_{mp}) \frac{\sin 2\beta_i}{2} \right) = \\ &= \frac{0,082}{4} \left(36000 \frac{0,082}{4} \cos 2,33 + 8490 \right) \left[\cos^2 2,33 + \operatorname{ctg}(30 + 31,4) \frac{\sin(2 \cdot 2,33)}{2} \right] + \end{aligned}$$

$$+ \frac{0,082}{4} \left(36000 \frac{0,082}{4} \cos 14,6 + 8490 \right) \left[\cos^2 14,6 + \operatorname{ctg}(30 + 31,4) \frac{\sin(2 \cdot 14,6)}{2} \right] = 25,3 \text{ Н};$$

$$\begin{aligned} M_{u.o.\delta o\kappa} &= \frac{h_B r_z}{n} \left(m_{\delta o\kappa} \frac{h_B}{n} \cos \beta_1 + m_{\delta o\kappa.c\pi} \right) \left(\cos^2 \beta_1 + \operatorname{ctg}(\delta + \phi_{mp}) \frac{\sin 2\beta_1}{2} \right) + \\ &+ \frac{h_B r_o}{n} \left(m_{\delta o\kappa} \frac{h_B}{n} \cos \beta_2 + m_{\delta o\kappa.c\pi} \right) \left(\cos^2 \beta_2 + \operatorname{ctg}(\delta + \phi_{mp}) \frac{\sin 2\beta_2}{2} \right) = \\ &= \frac{0,082 \cdot 0,32}{4} \left(9000 \frac{0,082}{4} \cos 2,33 + 740 \right) \left[\cos^2 2,33 + \operatorname{ctg}(30 + 31,4) \frac{\sin(2 \cdot 2,33)}{2} \right] + \\ &+ \frac{0,082 \cdot 0,05}{4} \left(9000 \frac{0,082}{4} \cos 14,6 + 740 \right) \left[\cos^2 14,6 + \operatorname{ctg}(30 + 31,4) \frac{\sin(2 \cdot 14,6)}{2} \right] = 4,3 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

4) Определение лобовых составляющих усилий резания для острых ножей
(3.74) - (3.76):

$$\begin{aligned} P_{o.c\theta} &= \phi m_{c\theta} \frac{h_\theta}{r_{kp} n} \left(\frac{h_\theta}{2\pi} \ln \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right) - \operatorname{ctg}(\delta + \phi_{TP}) \left(\frac{r_z - r_o}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} + \right. \right. \\ &+ \left. \left(r_{kp}^2 + \frac{h_\theta^2}{2\pi^2} \right) \arcsin \left(\frac{r_z - r_o}{2r_{kp}} \right) - \frac{h_\theta}{\pi} r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{h_\theta}{2\pi r_{kp}} \right)^2} \right) \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{\pi(r_z - r_o) \sqrt{r_{kp}^2 + \left(\frac{h_\theta}{2\pi} \right)^2}}{h_\theta \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2}} \right) \right) = \\ &= 0,59 \cdot 31000 \frac{0,082^2}{0,2 \cdot 4} \ln \left(\frac{\sin 14,6}{\sin 2,33} \right) - \operatorname{ctg}(30 + 31,4) \cdot 0,59 \cdot 31000 \frac{0,082}{0,2 \cdot 4} \left(\frac{0,32 - 0,05}{2} \times \right. \\ &\times \sqrt{0,2^2 - \left(\frac{0,32 - 0,05}{2} \right)^2} + \left(0,2^2 + \frac{0,082^2}{2\pi^2} \right) \arcsin \left(\frac{0,32 - 0,05}{2 \cdot 0,2} \right) - \frac{0,082}{\pi} 0,2 \sqrt{1 + \left(\frac{0,082}{2\pi \cdot 0,2} \right)^2} \times \\ &\times \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{\pi(0,32 - 0,05) \sqrt{0,2^2 + \left(\frac{0,082}{2\pi} \right)^2}}{0,082 \sqrt{0,2^2 - \left(\frac{0,32 - 0,05}{2} \right)^2}} \right) \right) = -22,7 \text{ Н}; \\ R_{u.o.c\theta} &= \phi m_{c\theta} \frac{h_\theta}{n} \left(\left(r_z - r_o + \frac{h_\theta}{2\pi} (\beta_1 - \beta_2) \right) + \operatorname{ctg}(\delta + \phi_{TP}) \frac{h_\theta}{2\pi r_{kp}} \times \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right) \sqrt{r_{kp}^2 + \frac{h_6^2}{2\pi^2}} \ln \left(\frac{\left(\left(\frac{r_z - r_o}{2} \right) \sqrt{r_{kp}^2 + \frac{h_6^2}{2\pi^2}} + \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} \right)}{\left(\left(-\frac{r_z - r_o}{2} \right) \sqrt{r_{kp}^2 + \frac{h_6^2}{2\pi^2}} + \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} \right)} \right) \Bigg) = \\
& = 0,59 \cdot 31000 \frac{0,082}{4} \left(0,32 - 0,05 + \frac{0,082}{2\pi} (2,33 - 14,6) \right) + ctg(30 + 31,4) \times \\
& \quad \times 0,59 \cdot 31000 \frac{0,082^2}{2\pi \cdot 0,2 \cdot 4} \left(\frac{0,32 - 0,05}{2} \right) \sqrt{0,2^2 + \frac{0,082^2}{2\pi^2}} \times \\
& \quad \times \ln \left(\frac{\left(\left(\frac{0,32 - 0,05}{2} \right) \sqrt{0,2^2 + \frac{0,082^2}{2\pi^2}} + \sqrt{0,2^2 - \left(\frac{0,32 - 0,05}{2} \right)^2} \right)}{\left(\left(-\frac{0,32 - 0,05}{2} \right) \sqrt{0,2^2 + \frac{0,082^2}{2\pi^2}} + \sqrt{0,2^2 - \left(\frac{0,32 - 0,05}{2} \right)^2} \right)} \right) = 100,2 \text{ Н}; \\
\\
& M_{u.o.c6} = \phi m_{c6} \frac{h_6^2}{2\pi r_{kp} 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_{kp}} \times \right. \\
& \quad \times \left(\frac{r_z - r_o}{2} \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2} + 2 \left(\frac{r_{kp}^2}{2} + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2 \right) \arcsin \left(\frac{r_z - r_o}{2r_{kp}} \right) - \right. \\
& \quad \left. \left. - \frac{h_6}{\pi} r_{kp} \sqrt{1 + \left(\frac{h_6}{2\pi r_{kp}} \right)^2} \arctg \left(\frac{\pi (r_z - r_o) \sqrt{r_{kp}^2 + \left(\frac{h_6}{2\pi} \right)^2}}{h_6 \sqrt{r_{kp}^2 - \left(\frac{r_z - r_o}{2} \right)^2}} \right) \right) \right) = \\
& = 0,59 \cdot 31000 \frac{0,082^3}{4\pi^2 \cdot 4} \left(\frac{\sin^2 14,6 - \sin^2 2,33}{2 \sin^2 2,33 \sin^2 14,6} + \ln \left(\frac{\sin 2,33}{\sin 14,6} \right) \right) + ctg(30 + 31,4) \cdot 0,59 \cdot 31000 \times \\
& \quad \times \frac{0,082^2}{2\pi \cdot 0,2 \cdot 4} \times - \left(\frac{0,32 - 0,05}{2} \sqrt{0,2^2 - \left(\frac{0,32 - 0,05}{2} \right)^2} + 2 \left(\frac{0,2^2}{2} + \left(\frac{0,082}{2\pi} \right)^2 \right) \arcsin \left(\frac{0,32 - 0,05}{2 \cdot 0,2} \right) - \right. \\
& \quad \left. - \frac{0,082}{\pi} 0,2 \sqrt{1 + \left(\frac{0,082}{2\pi \cdot 0,2} \right)^2} \arctg \left(\frac{\pi (0,32 - 0,05) \sqrt{0,2^2 + \left(\frac{0,082}{2\pi} \right)^2}}{0,082 \sqrt{0,2^2 - \left(\frac{0,32 - 0,05}{2} \right)^2}} \right) \right) = 19,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.
\end{aligned}$$

5) Определение общих усилий резания (1.26) - (1.28):

$$P_o = n(P_{o.св} + P_{бок}) = 4(-14,6 + (-22,7)) = -149,2 \text{ Н};$$

$$R_{и.о} = n(R_{и.о.св} + R_{и.о.бок}) = 4(25,3 + 100,2) = 502 \text{ Н};$$

$$M_{и.о} = n(M_{и.о.св} + M_{и.о.бок}) = 4(4,3 + 19,3) = 94,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6) Определение энергоемкости разрушения породы забоя ножевым ИО геолохода (3.86):

$$H_w = \frac{R_{и.о.св} + R_{и.о.бок}}{\frac{h_g^2}{2n^2} \left(\frac{\sin \beta_2 - \sin \beta_1}{\pi \sin \beta_1 \sin \beta_2} + \frac{k_{бок}^2}{n} \operatorname{ctg} \gamma (\cos^2 \beta_1 + \cos^2 \beta_2) \right)} =$$

$$= \frac{25,3 + 100,2}{\frac{0,082^2 (\sin 14,6 - \sin 2,33)}{2\pi \cdot 4 \sin 2,33 \sin 14,6} + 0,9^2 \frac{0,082^2}{2 \cdot 4^2} \operatorname{ctg} 30 (\cos^2 2,33 + \cos^2 14,6)} = 20 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3.$$

Значения требуемых силовых и энергетических параметров представлены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 –Требуемые силовые и энергетические параметры ИО демонстрационного образца геолохода

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Формула	Значение
Проекция составляющей силы сопротивления резанию, независимая от ширины среза, на ось вращения геолохода	$P_{о.бок}$	Н	3.28	-14,6
Проекция составляющей силы сопротивления резанию, независимая от ширины среза, на плоскость, перпендикулярную оси вращения	$R_{и.о.бок}$	Н	3.29	25,3
Момент сопротивления резанию, независимый от ширины среза	$M_{и.о.бок}$	Н·м	3.30	4,3
Проекция составляющей силы сопротивления резанию, зависящая от ширины среза, на ось вращения геолохода	$P_{о.св}$	Н	3.74	-22,7
Проекция составляющей силы сопротивления резанию, зависящая от ширины среза, на плоскость, перпендикулярную оси вращения	$R_{и.о.св}$	Н	3.75	100,2
Момент сопротивления резанию,	$M_{и.о.св}$	Н·м	3.76	19,3

зависящий от ширины среза				
Полная проекция силы сопротивления резанию на ось вращения геохода	P_o	Н	1.26	-149,2
Полная проекция силы сопротивления резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения	$R_{и.о.}$	Н	1.27	502
Полный момент сопротивления резанию	$M_{и.о.}$	Н·м	1.28	94,4
Энергоемкость разрушения породы забоя ножевым ИО геохода	H_w	кДж/м ³	3.86	20

Момент сопротивления резанию на исполнительном органе внешнего движителя:

$$M_{и.о.св}^e = \phi m_{св} b' t \left(r_z + \frac{t}{2} \right) \cos \beta = 0,59 \cdot 31000 \cdot 0,001 \cdot 0,1 \cdot \left(0,32 + \frac{0,1}{2} \right) \cos 6,49 = 0,67 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{и.о.бок}^e = 2t \cos \beta \left(r_z + \frac{t}{2} \right) (m_{бок} t + m_{бок.ср}) = 2 \cdot 0,1 \cdot \cos 6,49 \left(0,32 + \frac{0,1}{2} \right) (9000 \cdot 0,1 + 740) = 120,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{и.о.}^e = M_{и.о.св}^e + M_{и.о.бок}^e = 0,67 + 120,6 = 121,27 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Суммарные нормальных составляющих усилий внедрения элементов противовращения в приконтурный массив при движении геохода определялись по выражению 1.15:

$$\begin{aligned} P_{ср}^{en} &= \phi m_{св} b^{en} h^{en} + 2m_{бок} h^{en2} + 2m_{бок.ср} h^{en} = \\ &= 0,59 \cdot 31000 \cdot 0,001 \cdot 0,207 + 2 \cdot 9000 \cdot 0,207^2 + 2 \cdot 740 \cdot 0,207 = 1081,4 \text{ Н} \end{aligned}$$

Полученные значения требуемых силовых параметров используются при расчете требуемого вращающего момента приводного двигателя геохода. Расчет производится по выражению (5.1) в среде Mathcad.

Результатом расчета является значение требуемого вращающего момента приводного двигателя геохода, которое равно 652 Н·м.

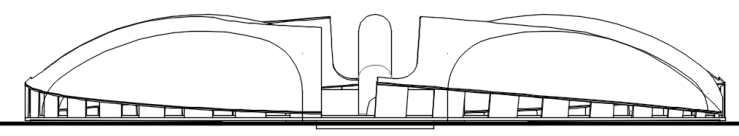
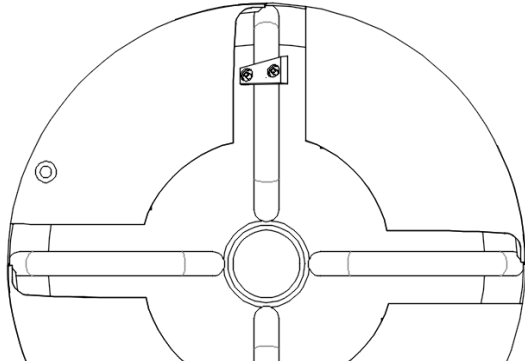
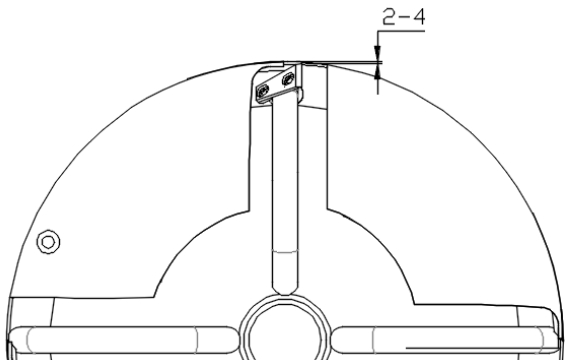
Требуемое значение вращающего момента приводного двигателя геохода меньше момента на выходном валу мотор-редуктора, следовательно, ранее выбранный двигатель обеспечивает, необходимый крутящий момент.

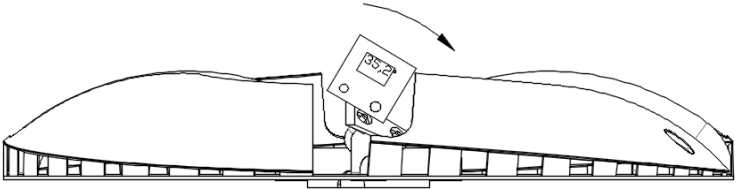
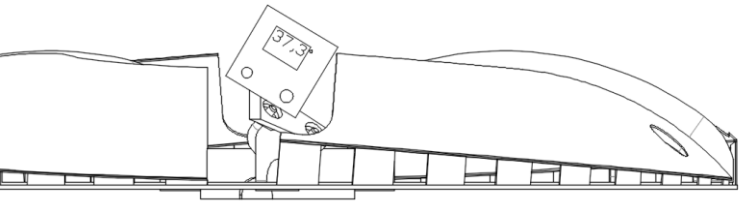
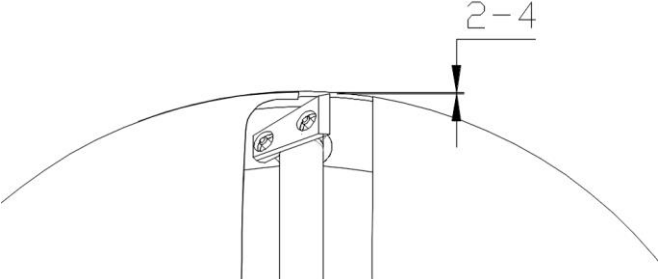
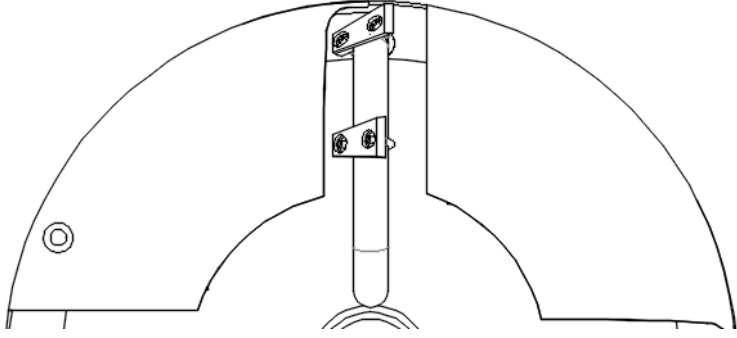
5.4 Изготовление и испытания демонстрационного образца геохода

По 3D-модели ДО геохода разработан комплект конструкторской документации (Рисунок 5.14) и изготовлен демонстрационный проходческий подземный аппарат класса «Геоход» (Приложение А) (Рисунок 5.14, 5.15, 5.1).

Для обеспечения геликоидности ИО главного забоя, который состоит из 32 ножей (4 луча по 8 шт), разработан порядок установки ножей, приведенный в таблице 5.11.

Таблица 5.11 –Порядок установки ножей на ИО ДО геохода

№	Наименование операции	Содержание операции	Иллюстрация
1	Установка на технологическую базу	1. Установить на горизонтально ровную поверхность ИО в сборе без ножей	
2	Установка пластины ножа на периферии	1. Предварительно установить на трубу первую пластину ножа	
		2. Выровнять указанный край пластинки за границу окружности корпуса ИО на расстояние 2-4 мм	

№	Наименование операции	Содержание операции	Иллюстрация
		3. Установить инструмент (Цифровой уровень/угломер) на поверхность (пункт 1), от которой необходимо измерить относительный угол, и нажать кнопку «ZERO»	
		4. Установить угломер на поверхность пластины ножа, показанной на иллюстрации. На дисплее отобразится значение относительного угла	
		5. Отрегулировать угол наклона пластинки ножа, вращая пластинку ножа относительно трубы (согласно таблице 5.12)	
		6. Проверить расстояние от края режущей кромки до окружности ИО (корпуса)	
3	Установка остальных пластин	1. Установить следующую пластину на трубе	

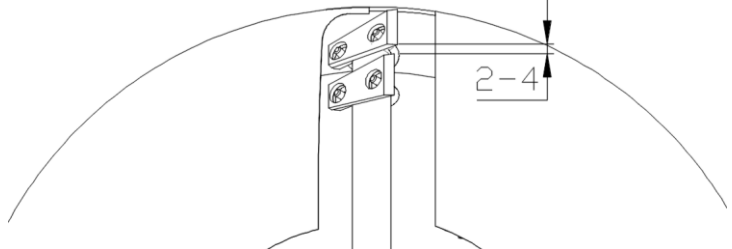
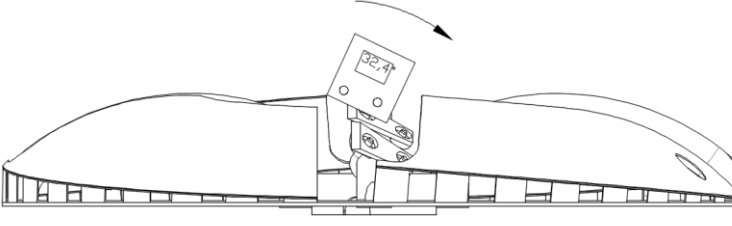
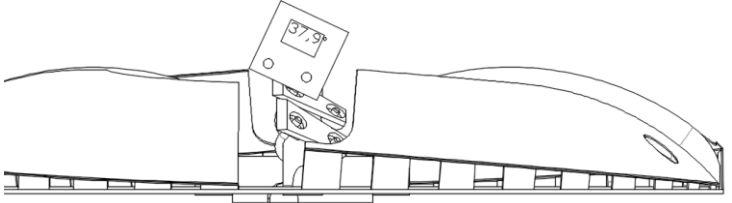
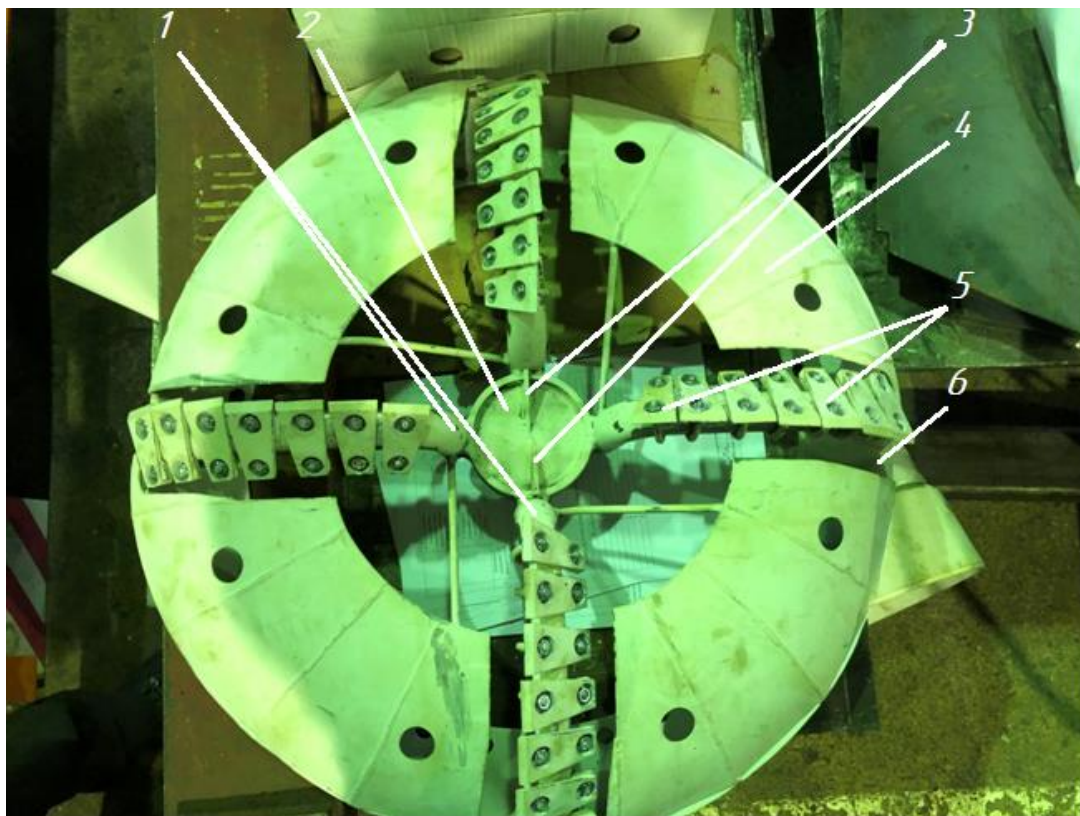
№	Наименование операции	Содержание операции	Иллюстрация
		2. Установить край режущей кромки пластины к краю режущей кромки предыдущей пластины на расстоянии 2-4 мм	
		3. Установить угломер на поверхность пластины ножа, показанной на иллюстрации. На дисплее отобразится значение относительного угла	
		4. Отрегулировать угол наклона пластинки ножа, вращая пластинку ножа относительно трубы (согласно таблице 5.12)	
		5. Повторить операцию для остальных пластин одной трубы	
4	Повторить операции 2,3 для остальных труб		

Таблица 5.12 – Углы установки ножей на трубе относительно горизонтали

№ пластины	1	2	3	4	5	6	7	8
Угол установки, град	37,3	37,9	38,3	38,9	39,9	41,4	43,9	48,7

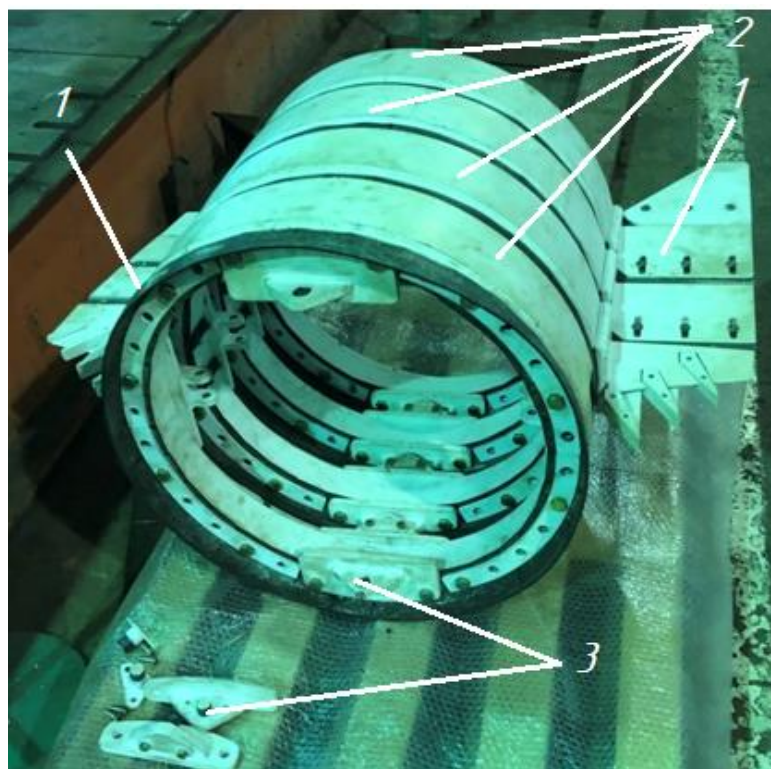
После изготовления, сборки и опробования демонстрационного образца геогохода, он был транспортирован в цех ООО «Стройиндустрия» для испытаний и демонстрации движения.

На первом этапе испытаний и демонстрации движения было принято решение запустить ДО геогохода, охваченный геосредой наполовину диаметра, со свободной лобовой поверхностью.



1 – трубка (луч); 2 – муфта; 3 – нож центральной части; 4 – сектор;
5 – режущий нож; 6 – основание

Рисунок 5.15 – Исполнительный орган демонстрационного образца геохода



1 – элемент противовращения; 2 – кольцо корпуса; 3 – шарнир

Рисунок 5.16 – Опорный модуль демонстрационного образца геохода в сборе



1 – исполнительный орган; 2 – внешний движитель; 3 – тяговый модуль;
4 – опорный модуль; 5 – элемент противовращения

Рисунок 5.17 – Общий вид демонстрационного образца геохода

Предварительно в геосреде, находящейся в стенде, была подготовлена траншея глубиной 0,32 м (радиус геохода). Далее ДО геохода был перемещен в стенд (Рисунок 5.18 и 5.19).



Рисунок 5.18 – Установка ДО геохода на стенде



Рисунок 5.19 – Начальное положение ДО геохода перед запуском

После запуска ДО геохода контролировались скорость вращения внешнего движителя, перемещение его вперед.

Первый цикл движения длился 6 минут 24 секунды, ДО геохода совершил 3 оборота и переместился на 75 мм (Рисунок 5.20).



Рисунок 5.20 – Положение ДО геохода после первого цикла движения

Второй цикл движения длился 6 минут 24 секунды, ДО геохода совершил 3 оборота и переместился на 80 мм (Рисунок 5.21).

Третий цикл движения длился 6 минут 24 секунды, ДО геохода совершил 3 оборота и переместился на 95 мм (Рисунок 5.22).

Четвертый цикл движения длился 6 минут 20 секунд, ДО геохода совершил 2,99 оборота и переместился на 110 мм (Рисунок 5.23), но произошла остановка ДО геохода по причине заклинивания геосреды (песка) в цевочной передаче.



Рисунок 5.21 – Положение ДО геохода после второго цикла движения



Рисунок 5.22 – Положение ДО геохода после третьего цикла движения

В результате первого этапа испытаний наглядно продемонстрировано движение подземного аппарата в геосреде с использованием геосреды. За 11,99 обо-

ротов внешнего движителя ДО геохода прошел 360 мм. При шаге внешнего движителя 0,3 м, в песке ДО геохода перемещается в среднем на 30 мм на один оборот, что составляет 10 % от параметра внешнего движителя.



Рисунок 5.23 – Положение ДО геохода после предварительных испытаний

Во втором этапе, были проведены испытания полностью охваченного геосредой ДО геохода (Рисунок 5.24).



Рисунок 5.24 –ДО геохода в геосреде

Испытания полностью охваченного геосредой ДО геохода проводились многократно. Каждое испытание включало в себя: установку ДО геохода в стенд, засыпка его, запуск, движение, остановка, демонтаж ДО геохода из стенда. Часть замеров движения ДО геохода в геосреде представлены в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Результаты испытаний ДО геохода в геосреде

№ испытания	Длина перемещения, мм	Количество оборотов	Перемещение за оборот, мм/об
1	532	10,6	50,2
2	636	11,3	56,3
3	1204	24,1	50
4	1076	20,7	52
Σ	3448	66,7	

В результате испытаний полностью погруженного в геосреду ДО геохода, наглядно продемонстрировано движение подземного аппарата в геосреде с использованием геосреды. За четыре цикла движения, полностью погруженным в геосреду, ДО геохода прошел расстояние 3448 мм, совершив 66,7 оборота. Максимальное перемещение – 1204 мм (рисунок 5.25).



Рисунок 5.25 –ДО геохода в конце испытания

Каждое испытание заканчивалось остановкой ДО геохода по причине заклинивания геосреды (песка) в цевочной передаче. Это связано с тем, что погружно-транспортная система не в полной мере функционировала. Что в свою очередь создает актуальность исследований в этом направлении.

В ходе проведенных испытаний была достигнута цель ДО геохода, а именно демонстрация движения в геосреде с использованием геосреды.

5.5 Выводы

1) Разработана инженерная методика определения требуемых силовых и энергетических параметров ножевого ИО геохода. В соответствии с методикой разработан порядок, согласно которому определяются значения проекции полной силы сопротивления резанию на ось вращения геохода (P_o) и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода ($R_{и.о}$), а также момент сопротивления резанию ($M_{и.о}$) для острых ножей, а также энергоемкость разрушения породы забоя (H_w). Полученные по методике значения требуемых силовых и энергетических параметров являются одними из исходных данных к определению массогабаритных характеристик ножевого ИО геохода, а также энергосиловой установки геохода в целом.

2) По разработанной методике определены предварительные силовые и энергетические параметры ИО ДО геохода, по которым выбран мотор-редуктор и разработана цевочная передача.

3) В ходе конструкторских проработок разработана 3D-модель ДО геохода, описана конструкция и получены параметры ДО геохода.

4) Произведен расчет требуемых силовых и энергетических параметров ИО демонстрационного образца геохода. Согласно исходным данным требуемые значения $P_o = -149,2$ Н, $R_{и.о} = 502$ Н, $M_{и.о} = 94,4$ Н·м и $H_w = 20$ кДж/м³.

5) Разработана конструкторская документация и изготовлен исполнительный орган демонстрационного проходческого подземного аппарата класса «Геоход».

6) Для обеспечения геликоидности ИО главного забоя при сборке разработан порядок установки ножей.

7) В ходе первого этапа испытаний продемонстрировано движение подземного аппарата в геосреде с использованием геосреды. За 11,99 оборотов внешнего движителя ДО геохода прошел 360 мм. При шаге внешнего движителя 0,3 м в песке ДО геохода перемещается в среднем на 30 мм на один оборот, что составляет 10 % от параметра внешнего движителя.

8) В ходе второго этапа испытаний, полностью охваченного геосредой ДО геохода, продемонстрировано движение подземного аппарата в геосреде с использованием геосреды. За четыре цикла движения, полностью погруженным в геосреду, ДО геохода прошел расстояние 3448 мм, совершив 66,7 оборота. Максимальное перемещение составило 1204 мм.

Представленные выводы являются итогами решения четвертой поставленной в диссертации задачи – «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 аналити-

ческих 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 $r_{кр} = r_z$, силовые и энергетические параметры ИО на 6 % меньше, чем при прямой форме. При выпуклой форме режущей кромки ножа и $r_{кр} = \frac{r_z - r_o}{2}$ 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 геолода с породой забоя при разрушении более крепких пород.
- 2) Определение дополнительных сопротивлений при резании от:
 - сил трения о породы забоя;
 - призмы волочения на ИО геолода;
 - износа режущей кромки ножа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашкин А.Г., Зенцов В.Н., Улицкий В.М. Развитие подземного пространства мегаполиса / Жилищное строительство. 2018. № 9. С. 30-36.
2. Беляев В.Л., Беляев В.Б. Освоение подземного пространства городов в аспекте их устойчивого развития. М. : МГСУ, 2012. 198 с.
3. Аксенов В.В. Концепция создания перспективного технологического уклада формирования (освоения) подземного пространства на базе опережающего развития новых подходов в строительной геотехнологии и геотехнике. Часть 1 / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, В.Ю. Бегляков // Вестник КузГТУ. - 2018. - №4. - С. 105-113.
4. Картозия, Б.А. Освоение подземного пространства крупных городов. Новые тенденции//Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) № 1, 2015 -С. 615 -629.
5. Картозия Б.А. и др. Шахтное и подземное строительство. Том 1. Учебник для вузов. М., изд-во Академии горных наук, 2001г. -607с.
6. Маркетинговое исследование рынка проходческих щитов и оценка объемов работ по строительству подземных выработок (сооружений) в России, 2012-2015 гг. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.megaresearch.ru/issledovaniya/syre/mineraly-gornye-porody/22904> М-Research. (дата обращения: 05.09.2020).
7. Аксенов В. В., Хорешок А.А., Ефременков А.Б., Казанцев А.А., Бегляков В.Ю., Вальтер А.В. Создание нового инструментария для формирования подземного пространства //Горная техника. – 2015. – №. 1. – С. 24-26.
8. Аксенов В.В. Концепция создания перспективного технологического уклада формирования (освоения) подземного пространства на базе опережающего развития новых подходов в строительной геотехнологии и геотехнике. Часть 2 / В.В. Аксенов, А.А. Хорешок, В.Ю. Бегляков // Вестник КузГТУ. - 2018. - №5. - С. 43-51.

9. Штумпф Г. Г. Механические свойства горных пород Кузнецкого угольного бассейна и закономерности их изменения // Физические проблемы разработки полезных ископаемых, 1994-№4. С. 43-50.

10. Садовец В.Ю., Бегляков В.Ю., Пашков Д.А. Физико-механические свойства горных пород малой крепости // В сборнике: Перспективы инновационного развития угольных регионов России Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. Ответственные редакторы Пудов Е. Ю., Клаус О. А.. 2016. С. 142-147.

11. Аксенов, В.В. Геовинчестерная технология проведения горных выработок / В.В. Аксенов. – Кемерово: ИУУ СО РАН, 2004. – 263 с.

12. Горбунов В.Ф., Аксёнов В.В., Садовец В.Ю. Экспертная оценка влияния особенностей нового класса горнопроходческой техники на методику расчета его параметров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2004. № 6-1 (43). С. 43-45.

13. Аксенов В.В. Научные основы геовинчестерной технологии проведения горных выработок и создания винтоповоротных агрегатов // автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Институт угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук. Кемерово, 2004

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

15. Аксенов, В.В. Геовинчестерная технология и геоходы – инновационный подход к освоению подземного пространства / В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков // Эксперт-Техника. – 2008. – № 1. – С. 18–22.

16. Садовец В. Ю. Обоснование конструктивных и силовых параметров ножевых исполнительных органов геоходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Садовец Владимир Юрьевич. – Кемерово, 2007. – 19 с.

17. Горбунов В.Ф., Аксенов В.В., Садовец В.Ю. Структурная матрица горнопроходческих систем // В сборнике: СЛУЖЕНИЕ ДЕЛУ Сборник материалов, посвященный 80-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора,

заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации М.С. Сафохина. Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева. Кемерово, 2006. С. 77-84.

18. Эллер, А.Ф. Винтоповоротные проходческие агрегаты / А.Ф. Эллер, В.Ф. Горбунов, В.В. Аксенов. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1992. – 192 с.

19. Горбунов В.Ф., Аксенов В.В. Геовинчестерная технология проведения горных выработок агрегатом ЭЛАНГ // Совершенствование техники и технологии шахтного строительства: Сб. науч. тр. / КузГТУ, Кузниишахтстрой. - Кемерово, 1987. – с. 118-121.

20. Эллер, А.Ф. Разработка и испытание щитового вращающегося проходческого агрегата ЭЛАНГ / А.Ф. Эллер, В.В. Аксенов, В.Д. Нагорный // Совершенствование техники, технологии и организации шахтного строительства / Тез. докл. – Кемерово. – 1985. – С. 30–31.

21. Горбунов, В.Ф. Разработка и испытание щитового вращающегося проходческого агрегата ЭЛАНГ / В.Ф. Горбунов, А.Ф. Эллер, В.В. Аксенов, В.Д. Нагорный, Ю.П. Савельев // Шахтное строительство. – 1985. – № 6. – С. 8–11.

22. Горбунов, В.Ф. Разработка и шахтные испытания вращающегося проходческого агрегата ЭЛАНГ / В.Ф. Горбунов, А.Ф. Эллер, В.В. Аксенов // Уголь. – 1989. – № 9. – С. 33–34.

23. Аксенов В.В., Изаксон В.Ю., Черданцев Н.В., Анферов Б.А., Кузнецова Л.В. Способ проведения подземной горной выработки круглого поперечного сечения // патент на изобретение RUS 2369742 26.03.2008

24. Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Вальтер А.В., Ефременков А.Б., Казанцев А.А. Опыт участия Юргинского технологического института (филиала) НИ ТПУ в проекте по организации высокотехнологичного производства (ппрф №218) // Технологии и материалы. 2016. № 2. С. 10-17.

25. Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Казанцев А.А., Вальтер А.В., Ефременков А.Б. Опыт участия в проекте по организации высокотехнологичного производства // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 8 (126). С. 8-15.

26. Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Блащук М.Ю., Ефременков А.Б., Казанцев А.А., Хорешок А.А., Вальтер А.В. Геоход: задачи, характеристики, перспективы // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 8 (126). С. 3-8.

27. Лелюх Б.Ф., Аксенов В.В., Ефременков А.Б. Биротативный проходческий щитовой агрегат // патент на изобретение RUS 2412354 31.07.2009.

28. 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 C1, 15.10.2019.

29. Аксенов В.В., Сляднев А.В., Ефременков А.Б., Хорешок А.А., Масалитин Б.Г., Бегляков В.Ю., Тимофеев В.Ю. Геоход (проходческий щитовой агрегат) // патент на изобретение RUS 2552539 04.12.2013.

30. Аксенов В.В., Ефременков А.Б., Лелюх Б.Ф., Садовец В.Ю. Дуплексный геоход // патент на изобретение RUS 2469192 24.05.2011.

31. Горбунов В.Ф., Эллер А.Ф., Аксенов В.В., Нагорный В.Д., Скоморохов В.М. Проходческий щитовой агрегат // патент на изобретение RUS 1229354 24.04.1984.

32. Эллер А.Ф., Аксенов В.В., Нагорный В.Д., Горбунов В.Ф. Проходческий щитовой агрегат // патент на изобретение RUS 1328531 23.10.1985

33. Эллер А.Ф., Горбунов В.Ф., Аксенов В.В., Пушкина Н.Б., Саруев Л.А., Крауиньш П.Я. Проходческий щитовой агрегат // патент на изобретение RUS 1668678 02.08.1989.

34. Эллер А.Ф., Горбунов В.Ф., Аксенов В.В. Проходческий щитовой агрегат // патент на изобретение RUS 1719642 04.05.1987.

35. Аксенов В.В., Ефременков А.Б., Блащук М.Ю., Лелюх Б.Ф., Бегляков В.Ю. Проходческий щитовой агрегат // патент на полезную модель RUS 112269 13.12.2010.

36. Эллер А.Ф., Аксенов В.В., Пушкина Н.Б. Проходческий щитовой агрегат // патент на изобретение RUS 2066762 4.

37. Аксенов В.В., Ефременков А.Б., Тимофеев В.Ю., Бегляков В.Ю., Блащук М.Ю. Проходческий щитовой агрегат (геоход) // патент на изобретение RUS 2418950 05.10.2009.

38. Аксенов В.В., Вальтер А.В., Бегляков В.Ю. Обеспечение геометрической точности оболочки при сборке секций геохода // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 4 (65). С. 19-28.

39. Вальтер А.В., Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Чазов П.А. Определение погрешности расположения секторов стабилизирующей секции геохода на основе данных координатного контроля // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2015. № 4 (69). С. 31-42.

40. Вальтер А.В., Аксенов В.В. Варианты обеспечения точности оболочек и собираемости корпусов геохода // Механики XXI века. 2015. № 14. С. 89-92.

41. Вальтер А.В., Аксенов В.В. Определение отклонений геометрической формы оболочек корпусных изделий геохода // В сборнике: Актуальные проблемы современного машиностроения Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Юргинский технологический институт. 2014. С. 165-170.

42. Аксенов В.В., Вальтер А.В. Специфика геоходов как объектов производства и проблемы создания технологий их изготовления // Горный инженер. 2013. № 1. С. 222-233.

43. Аксенов В.В., Садовец В.Ю. Моделирование особенностей движения геохода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2007. № 1 (59). С. 20-22.

44. Бегляков В.Ю. Обоснование параметров поверхности взаимодействия исполнительного органа геохода с породой забоя: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Бегляков Вячеслав Юрьевич. – Юрга, 2012. – 139 с.

45. Аксенов В.В., Магазов С.В., Хорешок А.А., Бегляков В.Ю., Садовец В.Ю., Пашков Д.А. Геодинамика подземных аппаратов. Формула специальности, области исследований // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 2 (138). С. 31-41.

46. Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Коперчук А.В., Блащук М.Ю., Садовец В.Ю., Пашков Д.А. Создание проходческих подземных аппаратов, взаимодействующих с геосредой. Области исследований//Горное оборудование и электро-механика. 2020. № 2 (148). С. 3-12.

47. Бегляков В.Ю., Аксенов В.В. Поверхность забоя при проходке горной выработки геогодом // Saarbrücken, 2012.

48. Бегляков В.Ю. Обоснование параметров поверхности взаимодействия исполнительного органа геогода с породой забоя: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Садовец Владимир Юрьевич. – Кемерово, 2012. – 19 с.

49. Sadovets V.Yu., Beglyakov V.Yu., Efremenko A.B. Simulation of geokhod movement with blade actuator // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 770. С. 384-390.

50. Садовец В.Ю., Аксенов В.В. Ножевые исполнительные органы геогодов//Saarbrücken, 2011.

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

52. Аксенов В.В., Ефременков А.Б., Садовец В.Ю., Бегляков В.Ю. Влияние уступа на НДС призабойной части горной выработки, при проходке геогодом. 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.

53. Аксенов В.В., Ефременков А.Б., Бегляков В.Ю. Влияние суммарного воздействия исполнительных органов горных машин на напряжения в зоне действия отдельно взятого резца // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № S5. С. 15-21.

54. Аксенов В.В., Костинец И.К., Бегляков В.Ю. Влияние угла наклона поверхности взаимодействия исполнительного органа геогода с породой забоя на её

напряженно-деформированное состояние // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № S2. С. 30-36.

55. Аксенов В.В., Хорешок А.А., Костинец И.К., Бегляков В.Ю. Зависимость напряженно-деформированного состояния забоя от угла наклона поверхности взаимодействия исполнительного органа геолода с геосредой // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 5 (93). С. 12-15.

56. Аксенов В.В., Садовец В.Ю., Пашков Д.А. Обоснование необходимости создания исполнительного органа геолода для разрушения пород малой крепости // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 6 (118). С. 8-15.

57. Горное дело. Терминологический словарь/Л.И. Барон, Г.П. Демидюк, Г.Д. Лидин и др. 3-е изд., перераб. и доп.—М.: Недра, 1981, 479 с.

58. Клорикьян, В.Х. Горнопроходческие щиты и комплексы / В.Х. Клорикьян, В.А. Ходош. — М.: Недра, 1977. — 326 с.

59. Бреннер, В.А. Щитовые проходческие комплексы: Учебное пособие / В.А. Бреннер, А.Б. Жабин, М.М. Щеголевский, Ал.В. Поляков, Ан.В. Поляков. — М.: Горная книга, МГГУ, 2009. — 447 с.

60. Логунцов, В.М. Механизированные проходческие щиты / В.М. Логунцов. — М.: ВИНТИ, 1971. — 269 с.

61. Самойлов, В.П. Новейшая японская техника щитовой проходки тоннелей: Справочно-информационное издание / В.П. Самойлов, В.С. Малицкий. — М.: Империя Пресс, 2004. — 232 с.

62. Maidl, B. Hardrock Tunnel Boring Machines / B. Maidl, L. Schmid, W. Ritz, M. Herrenknecht. Berlin: Ernst& Sohn, 2008. — 343 p.

63. Рыбаков А.П. Основы бестраншейных технологий // М.: ПрессБюро, 2005. — 304 с.

64. Разработка технологии бестраншейной прокладки трубопроводов: Метод. указания/СПбГАСУ; Сост. В. В. Верстов, Л. Д. Копанская, Г. А. Белов. СПб, 2008 г. 66 с.

65. Горизонтально направленное бурение [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://unistroy55.ru/pipeline/gnb/> (дата обращения: 04.04.2020).
66. Машины для земляных работ: Учебник / Гаркави Н.Г., Аринченков В.И., Карпов В.В. и др.; под ред. Н.Г. Гаркави.—М.: Высш. Школа, 1982.—335 с., ил.
67. Малевич Н.А. Горнопроходческие машины и комплексы: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / Н.А. Малевич. — М.: Недра, 1980. — 384 с.
68. Аксенов В.В., Ефременков А.Б., Садовец В.Ю., Тимофеев В.Ю., Бегляков В.Ю., Блащук М.Ю. Формирование требований к основным системам геохода // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S10. С. 107-118.
69. Ефременков А.Б. Разработка научных основ создания систем геохода: дис. ... док-ра техн. наук: 05.05.06 / Ефременков Андрей Борисович. — Кемерово, 2016.-314 с.
70. Ананьев К.А., Ермаков А.Н., Садовец В.Ю. Требования к исполнительным органам геоходов // В сборнике: РОССИЯ МОЛОДАЯ. Сборник материалов VI всероссийской, 59-й научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. Ответственный редактор: Блюменштейн В.Ю., 2014. С. 8.
71. Ананьев К.А. Создание исполнительного органа геохода для разрушения пород средней крепости: дис. ... кан-та техн. наук: 05.05.06 / Ананьев Кирилл Алексеевич. — Кемерово, 2016.-144 с.
72. Ермаков А.Н. Обоснование параметров законтурных исполнительных органов геоходов для разрушения пород средней крепости: дис. ... кан-та техн. наук: 05.05.06 / Ермаков Александр Николаевич. — Кемерово, 2016.-158 с.
73. Xiaoqian Sun. Multiple Criteria Decision Analysis Techniques in Aircraft Design and Evaluation Processes – Vom Promotionsausschuss der Technischen Universität Hamburg-Harburg zur Erlangung des akademischen Grades, 2012. — 199 с.
74. Ishizaka A., Nemery P. Multi-criteria decision analysis: methods and software. — John Wiley & Sons, 2013. — 296 с.
75. Hwang, C. L. Multiple attributes decision making methods and applications / C. L. Hwang, K. Yoon. Heidelberg, Berlin: Springer, 1981.

76. Горячкин В.П. Собрание сочинений: В 2 т. Т. 2- М.: Колос, 1965.- 460 с.
77. Домбровский Н.Г. Сопротивление грунта копанию при работе одноковшового экскаватора. В кн.: Резание грунтов. М., изд. АН СССР, 1951, с. 42-75.
78. Домбровский Н.Г. Экскаваторы. М., «Машиностроение», 1969. 320 с.
79. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами.- М.: Машиностроение, 1968.-375с.
80. Зеленин А.Н. Физические основы теории резания грунтов. М. – Л., изд. АН СССР, 1950, 354 с.
81. Абезгауз В. Д. Режущие органы машин фрезерного типа для разработки горных пород и грунтов. М., «Машиностроение», 1965.– 280 с.
82. Ветров Ю.А., Баладинский В.Л. Машины для специальных земляных работ. – Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1980.– 308 с.
83. Ветров, Юрий Александрович. Резание грунтов землеройными машинами. - Москва : Машиностроение, 1971. - 360 с.
84. Ветров Ю.А. Расчет сил резания и копания грунтов. – Киев: Изд-во Киев. Ун-та, 1985. 251 с.
85. Горное дело: Терминологический словарь / Под научной редакцией акад. РАН К.Н. Трубецкого, чл.-корр. РАН Д.Р. Каплунова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство «Горная книга», 2016. – 635 с.
86. Пашков Д.А. Обзор методик определения энергоемкости разрушения породы / Д.А. Пашков // XI Всероссийская, 64 науч.-практическая конф. молодых учёных с международным участием «Россия молодая». — Кемерово: КузГТУ, 2019 - С. 10310.
87. Пашков Д.А. Анализ методики определения энергоемкости разрушения породы / Д.А. Пашков // XI Всероссийская, 64 науч.-практическая конф. молодых учёных с международным участием «Россия молодая». — Кемерово: КузГТУ, 2019 - С. 10308.
88. 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 международ-

ной научно-практической конференции. — Междуреченск: изд-во КузГТУ, 2020. — С. 139.

89. 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.

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

91. 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.

92. Пашков Д.А. Классификация схемных решений исполнительного органа геохода 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.

93. 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. Efremenko, V.Yu. Sadovets, D.A. Pashkov, V.A. Efremenko // 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. С. 012002.

94. Aksenov V. Analysis of compliance with the requirements for geohod 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. С. 03011.

95. Aksenov V.V. Determining the interaction surface parameters of the geokhod knife operating body with the face rock / V.V. Aksenov, A.B. Efremenko, V.Yu. Sadovets, D.A. Pashkov, V.A. Efremenko // 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. С. 012003.

96. Aksenov V.V. Influence of the knife shape on the operating body cutting force / V.V. Aksenov, A.B. Efremenko, V.Yu. Sadovets, D.A. Pashkov, V.A. Efremenko // 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. С. 012004.

97. 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.

98. 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.

99. 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.

100. 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.

101. 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.

102. 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.

103. 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.

104. 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.

105. Костинец И.К. Обоснование параметров опорной поверхности внешнего движителя геохода: дис. ... кан-та техн. наук: 05.05.06 / Костинец Ирина Константиновна. – Кемерово, 2017. – 153 с.

106. 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.

107. Пашков Д.А. Влияние шага внешнего движителя на энергоемкость 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.

108. 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. С. 03024.

109. 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. Efremenko, V.Yu. Sadovets, D.A. Pashkov, V.A. Efremenko // 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.

110. 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. Efremenko, V.Yu. Sadovets, D.A. Pashkov, V.A. Efremenko // 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.

111. Дронов А.А. обоснование параметров узла сопряжения секций геохода: дис. ... кан-та техн. наук: 05.05.06 / Дронов Антон Анатольевич. – Кемерово, 2020. – 169 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

КОМПАС

650993, г. Кемерово, пр. Советский, д. 56
E-mail: mail@sib-npo.ru



СИБИРСКОЕ
научно-производственное
объединение

СПРАВКА

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Пашкова Дмитрия Алексеевича

Настоящей справкой подтверждается, что результаты диссертационной работы Пашкова Дмитрия Алексеевича «Обоснование силовых и энергетических параметров исполнительных органов геолохода для разрушения мягких пород» использованы при разработке демонстрационного образца геолохода в рамках реализации проекта «Разработка проходческого подземного аппарата класса «Геолоход».

Генеральный директор ООО "Сибирское НПО"

С. В. Магазов

Заместитель руководителя проекта
по технической части, к.т.н.



В.Ю. Бегляков