

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

«Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

На правах рукописи



Нозирзода Шодмон Салохидин

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
НОЖЕВЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ С УЧЕТОМ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТРЕБОВАНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ГЕОХОДА**

Специальность 2.8.8 «Геотехнология, горные машины»

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент

Ефременков Андрей Борисович

Великий Новгород – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОХОДЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ	11
1.1 Обзор существующих конструкций геогодов	11
1.2 Обзор конструкции исполнительных органов горнопроходческих агрегатов и геогодов	15
1.2.1 Исполнительные органы традиционных горнопроходческих агрегатов	15
1.2.2 Исполнительные органы геогодов	18
1.2.3 Требования к исполнительным органам геогода	20
1.2.4 Основные формы ножей исполнительного органа геогода для разрушения мягких пород	21
1.3 Обзор конструкторско-технологических решений в разработке инструментов горнопроходческих систем	26
1.4 Выбор метода анализа и принятий решений	30
1.5 Выводы	32
2 РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ НОЖЕВОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГЕОГОДА С УЧЕТОМ ЕГО УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ	33
2.1 Формирование эксплуатационных требований к ножевому исполнительному органу геогода	33
2.2 Элементы ножевого исполнительного органа геогода	36
2.2.1 Формирование конструктивных требований к каждому элементу НИО геогода	43
2.3 Разработка схемных решений НИО геогода и его элементов с учетом требований, предъявляемым к ним	44
2.4 Совершенствование математической модели взаимодействия ножей геликоидной формы с затупленной режущей кромкой ИО геогода с породой забоя	54
2.5 Анализ схемных решений НИО геогода на соответствие предъявляемым к ним эксплуатационным требованиям	60
2.6 Выводы	77
3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕЛИКОИДНЫХ ФОРМ НОЖЕЙ ИО ГЕОГОДА	79
3.1 Формирование исходных данных для разработки математической модели	79
3.2 Разработка математической модели прямого геликоидного ножа исполнительного органа геогода с учетом его работы и условий эксплуатации	84

3.3 Разработка математической модели выпуклого геликоидного ножа исполнительного органа геохода с учетом его работы и условий эксплуатации	88
3.4 Разработка математической модели полувыпуклого геликоидного ножа исполнительного органа геохода с учетом его работы и условий эксплуатации	94
3.4 Визуализация математической модели	96
3.5 Выводы	99
4 ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НОЖЕВЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ГЕОХОДА, ВКЛЮЧАЯ КОНСТРУКТИВНЫЕ, СИЛОВЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ	101
4.1 Определение конструктивных параметров НИО геохода при формировании геликоидной формы основных элементов	101
4.2 Обоснование выбора материалов для создания основных элементов ножевых исполнительных органов геохода, учитывая особенности его работы и эксплуатации	108
4.3 Разработка конструкторско-технологических решений по созданию основных элементов НИО геохода, учитывая требования к конструкции	116
4.4 Влияние конструктивных решений НИО геохода на технологические и силовые параметры взаимодействия его с породой	128
4.5 Топологическая оптимизация формы ножей исполнительного органа геохода с учетом особенностей его работы и условий эксплуатации	140
4.5 Выводы	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	154
ПРИЛОЖЕНИЕ А	168

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В условиях современного геоходостроения наблюдается растущий интерес к созданию эффективных и надежных геоходов, предназначенных для разрушения мягких пород. С увеличением объемов строительных и горных работ возникает необходимость в высокопроизводительных исполнительных органах, которые способны адаптироваться к различным условиям эксплуатации.

Несмотря на существующие разработки и исследования в данной области, до сих пор отсутствует единое понимание рациональных параметров, которые обеспечивали бы максимальную производительность и надежность ножевых исполнительных органов. Конструктивные, силовые и энергетические характеристики, ранее обоснованные в научных исследованиях, не всегда находят практическое применение из-за трудностей с их реализацией в производственных условиях.

Таким образом, значимость данной работы обусловлена необходимостью комплексного подхода к обоснованию рациональных характеристик ножевых исполнительных механизмов с учетом эксплуатационных требований при создании геохода. Это позволит не только улучшить технологичность процессов создания исполнительных органов, но и повысить их эксплуатационные характеристики, что, в свою очередь, будет способствовать более эффективному разрушению мягких пород с коэффициентом крепости до $f=1$ ед. по шкале профессора М.М. Протодяконова в различных условиях работы геохода. Вследствие этого работа, направленная на обоснование рациональных параметров исполнительных органов геохода для разрушения мягких пород, является актуальной.

Степень разработанности. Разработкой и исследованием исполнительных органов геохода занимались В.В. Аксенов, А.Б. Ефременков, В.Ю. Садовец, К.А. Ананьев, А.Н. Ермаков, Н.Б. Пушкина, В.Ю. Бегляков, Д.А. Пашков и др. В результате проведенных исследований были определены параметры ножевых исполнительных органов с прямой формой режущей кромки. Также был

установлен ряд кинематических и силовых характеристик барабанных и ножевых исполнительных органов геохода. Обоснованы параметры законтурных исполнительных органов геоходов для разрушения пород средней крепости, а также рациональная форма поверхности взаимодействия исполнительного органа геохода с породой, основанная на смещении значений главных напряжений в забойной породе в сторону растяжения. Была исследована связь силовых и энергетических показателей исполнительных органов геохода с процессом разрушения мягких пород и выяснено влияние формы режущей кромки на силовые характеристики в данном контексте. Определено, как параметры ножевых исполнительных органов геохода влияют на энергоемкость разрушения забойной породы.

В исследованиях Аксенова В.В., Садовца В.Ю., Ефременкова А.Б., Пашкова Д.А. не рассматривались:

- учет критериев и эксплуатационных требований при создании ножевых исполнительных органов геохода с учетом особенностей его работы;
- влияние конструкторско-технологических решений по созданию ножевых исполнительных органов геохода с учетом параметров площадки износа на силовые параметры геохода.

Целью данной работы является обоснование рациональных параметров исполнительных органов геохода для разрушения мягких пород.

Задачи:

1. Разработать и проанализировать схемные решения ножевых исполнительных органов геохода с учетом требований, предъявляемых к ним.
2. Разработать математические модели формирования геликоидных форм ножей исполнительных органов геохода.
3. Обосновать рациональные параметры ножевых исполнительных органов геохода, включая конструктивные, силовые и технологические аспекты.

Идея работы заключается в обосновании рациональных параметров ножевых исполнительных органов с учетом эксплуатационных требований при создании геохода и особенности его работы.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовался комплекс методов, включающий методы синтеза технических решений:

- на первом этапе выполняется анализ существующих решений в области механического разрушения горных пород и резания грунтов;
- создание 3D-моделей объектов и процессов с использованием SolidWorks;
- метод многокритериального анализа ELECTRE II;
- матричный метод преобразований систем координат; теории механического разрушения;
- метод программирования с использованием Matlab;
- метод конечных элементов;
- метод топологической оптимизации.

Объектом исследования является ножевой исполнительный орган геохода.

Предметом исследования являются силовые и технологические параметры конструкции, позволяющие повышать эффективность работы ножевых исполнительных органов геохода.

Научные положения, выносимые на защиту:

- изменение координат точек поперечного сечения ножа при прямой геликоидной форме зависит от таких параметров, как шаг внешнего движителя h_6 , расстояние от точки до оси вращения геохода h_z и радиус геохода r_z , для полувыпуклой и выпуклой геликоидной формы – от шага внешнего движителя h_6 , центрального угла, образующего профиль ножа φ_{max} , текущего угла, образующего профиль ножа φ , и радиуса геохода r_z ;
- влияние радиуса затупления кромки ножа на силовые параметры ножевых исполнительных органов геохода значительно возрастает с увеличением радиуса геохода, для малых радиусов геохода ($r_z < 1$ м) повышение радиуса затупления кромки ножа с 2 мм до 5 мм приводит к росту силы сопротивления резанию менее чем на 10%, для максимальных значений радиуса геохода ($r_z = 3$ м) увеличение радиуса затупления кромки ножа приводит к росту силы сопротивления резанию на 50-55%.

– топологическая оптимизация ножей исполнительных органов позволяет снизить их массу на 50% для прямых форм, на 45% для выпуклых и на 15% для геликоидной с воронкой при сохранении достаточной прочности и жесткости конструкции, что соответствует критериям минимизации массы и установленным требованиям, учитывая особенности эксплуатации геохода.

Достоверность и обоснованность научных утверждений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертационном исследовании, достигаются благодаря корректной постановке допущений, которые необходимы для разработки условий математического моделирования. Выводы обеспечиваются применением основополагающих принципов механики, прикладной математики и технологий в области горного машиностроения. Кроме того, результаты исследований демонстрируют логическую сходимость на различных этапах работы, что подтверждает их научную ценность и надежность.

Научная новизна работы:

– разработаны схемные решения ножевых исполнительных органов геохода, учитывающие установленные эксплуатационные требования, геометрические параметры поперечного сечения ножа для формирования режущей кромки, а также различные варианты конструкций, такие как прямая и полувыпуклая геликоидная форма ножей, центральный нож в виде кольца и цилиндрической формы, а также новые способы закрепления и компоновки элементов;

– впервые разработана математическая модель формирования геликоидной формы ножа исполнительных органов, которая определяет взаимосвязь между конструктивными параметрами и параметрами изменения сечения ножа по радиусу геохода, что может быть использовано для создания основных элементов ножевых исполнительных органов;

– установлены зависимости влияния радиуса затупления кромки ножа и радиуса кривизны геохода на силу сопротивления резанию и момент сопротивления, что подчеркивает важность конструкторско-технологических решений при проектировании ножевых органов для эффективного взаимодействия с породой;

– впервые получены результаты топологической оптимизации форм ножей, что позволило снизить массу прямого ножа на 50%, выпуклого – на 45%, и геликоидного с воронкой – на 15% при сохранении прочности и жесткости конструкции.

Теоретическая и практическая значимость работы. Расчет геометрических параметров поперечного сечения ножа и схемные решения исполнительных органов, математическая модель геликоидной формы ножа, конструкторско-технологические решения по созданию основных элементов исполнительных органов могут быть применены в проектно-конструкторских организациях, предприятиях, которые занимаются производством и эксплуатацией горнопроходческой техники, а также при обучении студентов по направлениям подготовки, связанных с производством горных машин.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты работы будут использованы при проектировании и производстве геогодов для строительства подземных объектов. Полученные данные о конструктивных параметрах и материалах ножей будут внедрены в процесс проектирования и производства, что позволит повысить эффективность и надежность геогодов в условиях современных требований к горным работам. Работы по данной тематике поддержаны грантами ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» и ГОАУ «Новгородский центр развития инноваций и промышленности».

Личный вклад автора:

– определены геометрические параметры поперечного сечения ножа исполнительных органов (ИО) геогода для формирования режущей кромки с учетом технологических особенностей конструкции;

– разработаны эксплуатационные требования к основным элементам ножевых исполнительных органов (НИО) с учетом ключевых элементов, материалов для создания элементов, технологических особенностей конструкции, условий эксплуатации и специфики работы геогода;

– впервые разработаны схемные решения НИО геолода, учитывающие эксплуатационные требования и инновационные конструкции, такие как прямая и полувыпуклая геликоидная форма ножей, центральный нож в виде кольца и цилиндрической формы, а также новые способы закрепления и компоновки элементов;

– впервые получены результаты топологической оптимизации форм ножей, что позволило снизить массу прямого ножа на 50%, выпуклого – на 45%, и геликоидного с воронкой – на 15% при сохранении прочности и жесткости конструкции;

– впервые установлено влияние формы отвала на эффективность использования материала, выявив, что прямая и выпуклая формы имеют стабильные результаты, в то время как геликоидная форма с воронкой демонстрирует снижение коэффициента использования материала при увеличении радиуса;

– впервые разработана математическая модель формирования геликоидной формы ножа ИО, которая определяет взаимосвязь между конструктивными параметрами и параметрами изменения сечения ножа по радиусу геолода, что может быть использовано для создания управляющих программ для высокоточной обработки;

– установлены зависимости влияния радиуса затупления кромки ножа и радиуса кривизны геолода на силу сопротивления резанию и момент сопротивления, что подчеркивает важность конструкторско-технологических решений при проектировании ножевых органов для эффективного взаимодействия с породой.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлены и получили одобрение на следующих научно-практических конференциях: Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2024» (Москва, 2024, 2025); «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2020), «Зимняя школа робототехники в Сириусе – 2022» (Сочи, 2022 г.); «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте»,

(Кемерово, 2020 г., 2022 г., 2024 г.), «Инновации в технике и технологиях» (Великий Новгород, 2022 г., 2023 г.), «Россия молодая» (Кемерово, 2022 г., 2024 г., 2025), «Рекультивация выработанного пространства: проблемы и перспективы» (Белово, 2023 г., 2024 г.); «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (Прокопьевск, 2024 г.); «Инновационные технологии в машиностроении» (Юрга, 2024 г.); «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири СИБРЕСУРС» (Кемерово, 2024).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 8 – в изданиях, рекомендованных ВАК, из них 3 – в изданиях, индексируемых в базе SCOPUS, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация включает введение, четыре главы и заключение, представлена на 168 страницах машинописного текста, в котором содержится 87 рисунков, 68 таблиц и список литературы, состоящий из 101 наименования.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОХОДЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

1.1 Обзор существующих конструкций геоходов

В последних исследованиях в области строительной геотехнологии и геотехники рассмотрены различные аспекты, касающиеся конструкций и технологий, применяемых в геоходах (рисунок 1.1). В источниках [1-2] обсуждаются вопросы, связанные с конструкциями корпусов, которые могут быть использованы в геоходах, а также представлены концепции создания перспективного технологического уклада для подземного пространства. Это свидетельствует о важности инновационных подходов в данном направлении, что может значительно повысить эффективность строительных работ.

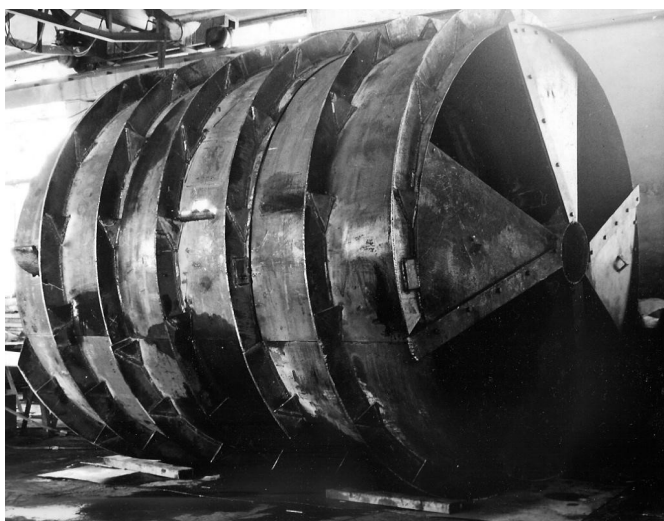


Рисунок 1.1 – Экспериментальный образец геохода ЭЛАНГ-3 диаметром 3 м

Геоход представляет собой новый подход к выполнению горных работ и формированию подземных пространств, базируясь на концепции, при которой процесс формирования горных выработок воспринимается как перемещение оборудования – цель, достигаемая путем перемещения тела внутри окружающей среды, представляющей собой вмещающие породы [3-10].

Такой метод позволяет более точно и эффективно реализовать горные монтажные операции, учитывая особенности среды и особенности перемещения

оборудования внутри нее. Подход существенно меняет традиционные методы проходки, поскольку фокусируется на движении твердого объекта в сложных горных условиях, что способствует повышению производительности и безопасности работ. Благодаря использованию геохода удастся оптимизировать процесс подземных выработок, адаптируя его под конкретные характеристики среды и требований проекта.

В современных исследованиях в области геотехнологий и горных машин особое внимание уделяется разработке и оптимизации различных технологий и конструкций, связанных с геоходами. В работах [11-14] рассматриваются научные основы геовинчестерной технологии и конструктивные параметры ножевых исполнительных органов геоходов, что способствует улучшению процессов проведения горных выработок.

Подчеркивается важность геоходов как основы для создания нового геотехнологического инструментария, который может быть использован для формирования подземного пространства и развития подземной робототехники [15-20]. Все указанные работы [1-20] представляют собой важный вклад в развитие технологий и конструкций геоходов, подчеркивая необходимость дальнейших исследований и внедрения инноваций в данную область.

В работах [3, 4] обоснованы параметры законтурных ИО и рациональная форма их взаимодействия с породой, основанная на смещении главных напряжений. Конструктивное решение ИО корончатого типа геохода представлено на рисунке 1.2.

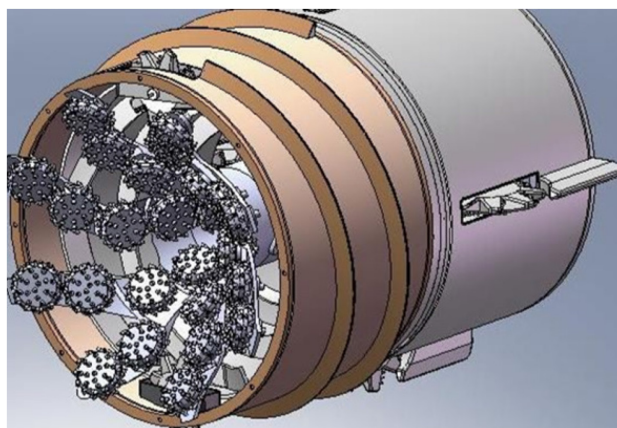
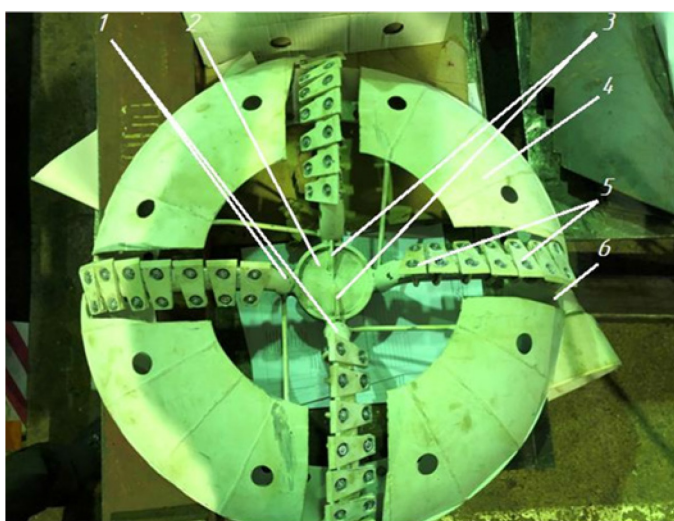


Рисунок 1.2 – Конструктивное решение ИО корончатого типа геохода

Авторы работ [5, 6] занимаются более узкоспециализированными вопросами, такими как определение точки входа резца барабанного ИО геолода в контакт с породой, а также аргументацией необходимости создания ИО для разрушения пород малой крепости. Эти исследования подчеркивают значимость детального подхода к проектированию и оптимизации геолодов как с точки зрения механики, так и целесообразности их использования в различных условиях. Была исследована взаимосвязь силовых и энергетических показателей ИО геолода с процессом разрушения мягких пород и выявлено влияние формы режущей кромки на силовые характеристики в НО (рисунок 1.3).



1 – трубка (луч); 2 – муфта; 3 – нож центральной части; 4 – сектор;
5 – режущий нож; 6 – основание

Рисунок 1.3 – НО геолода с выпуклой геликоидной формы

Авторы работы [7, 8] предлагают практические результаты, связанные с участием в высокотехнологичных проектах и влиянием параметров на образующую направляющей геликоидальной формы рабочего органа геолода. На рисунке 1.4 приведен демонстрационный образец геолода с НО выпуклой геликоидной формы [9-10]. Данные изобретения являются важными в понимании производственных процессов и их оптимизации в области геотехнологии. Это может привести к улучшению качества и сроков выполнения работ.



Рисунок 1.4 – Демонстрационный образец геохода с НИО выпуклой геликоидной формы

Таким образом, современные исследования в области геоходов подчеркивают важность комплексного анализа конструкций, механизмов и технологических процессов. В отличие, от известной техники, в частности проходческих щитов и комбайнов, которые широко используются при проходке туннелей и строительстве метро, имеет совершенно иной принцип действия. Сами щиты и комбайны не используют геосреду для создания напорного усилия на породу как разрушающий модуль. Геоход руководствуется данным принципом за счет того, что создаются дополнительные винтовые и продольные каналы. Именно усилие, создаваемое винтовыми движителями, специально установленными на него, как раз и может передаваться на породу. Существующая в настоящее время горнопроходческая техника не задействует геосреду в процессе работы. Поэтому она работает на небольших углах наклона и не может перемещаться в любом направлении подземного пространства, ей также недоступны и отклонения от прямолинейного движения.

1.2 Обзор конструкции исполнительных органов горнопроходческих агрегатов и геолозов

1.2.1 Исполнительные органы традиционных горнопроходческих агрегатов

Основной функцией исполнительных органов проходческих комбайнов и щитов является разрушение пород при проведении горных выработок. Каждый исполнительный орган, исходя из своих технологических возможностей, предназначается для определенной породы разных коэффициентов крепости.

Основным назначением исполнительных органов проходческих машин является эффективно разрушать горный массив на транспортабельные куски с наименьшим измельчением, пылеобразованием и удельным расходом энергии.

На врубовых машинах применяются баровые исполнительные органы, на струговых установках – струговые, на очистных комбайнах — шнековые, барабанные, буро-скалывающие, баровые и различные комбинации их с дисковыми и штанговыми исполнительными органами, имеющими вспомогательное значение и небольшое применение.

Роторные исполнительные органы проходческих систем делятся на три вида, в зависимости от распределения инструмента [21]. Роторные исполнительные органы имеют ряд недостатков и преимуществ по сравнению другими исполнительными органами, которые приведены на рисунке 1.5.

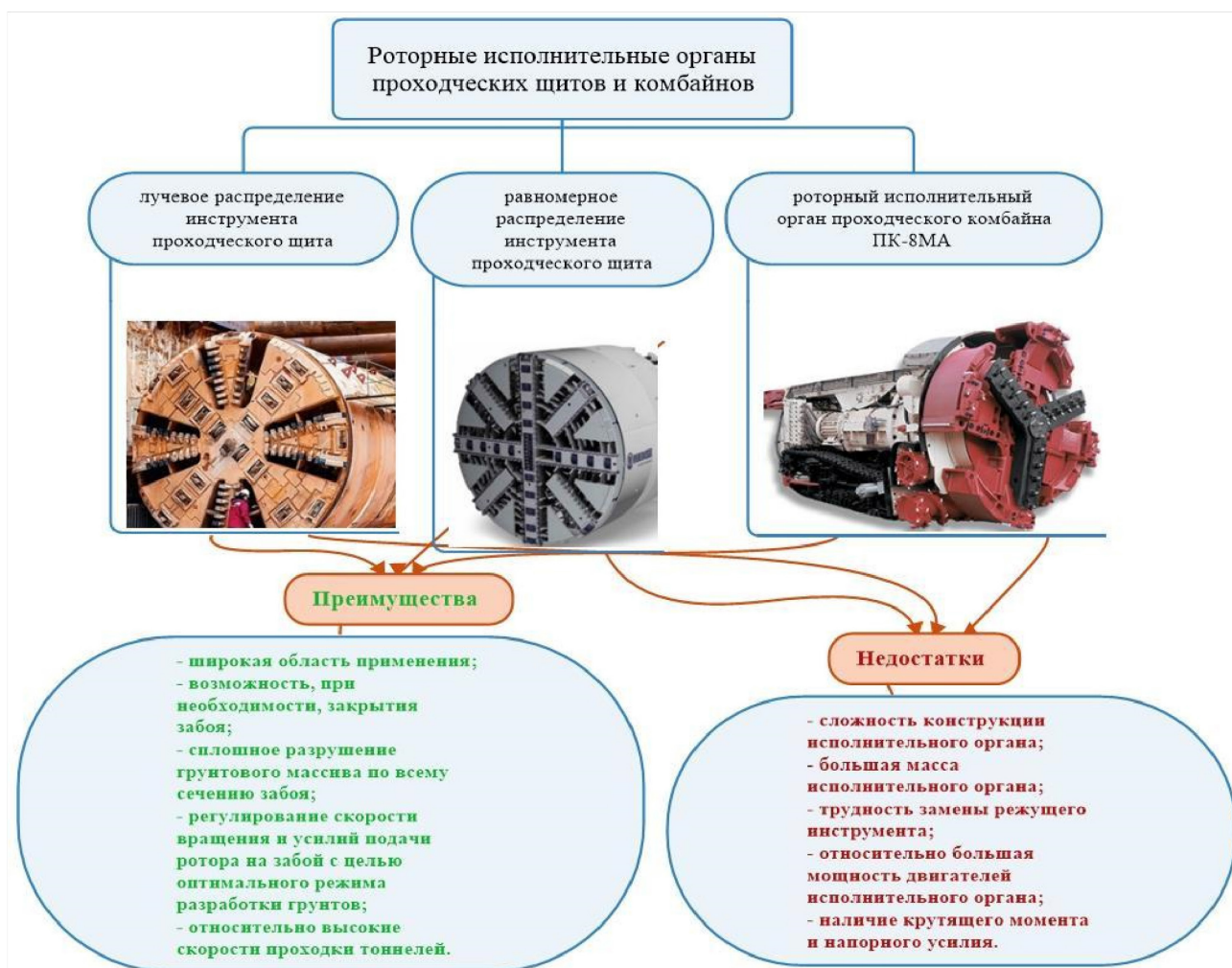


Рисунок 1.5 – Преимущества и недостатки роторных ИО проходческих систем

В планетарных исполнительных органах режущий инструмент перемещается по сложной кривой. Применяется как с горизонтальным, так и с вертикальным вращением [22]. Планетарные органы разрушения нашли применение в проходческих комбайнах и агрегатах для проходки вертикальных стволов. Исполнительные органы планетарного типа имеют, как правило, ковшовый погрузочный орган.

Планетарные и барабанные исполнительные органы разрушения обладают рядом достоинств по сравнению с буровыми роторного типа, которые приведены на рисунке 1.6.

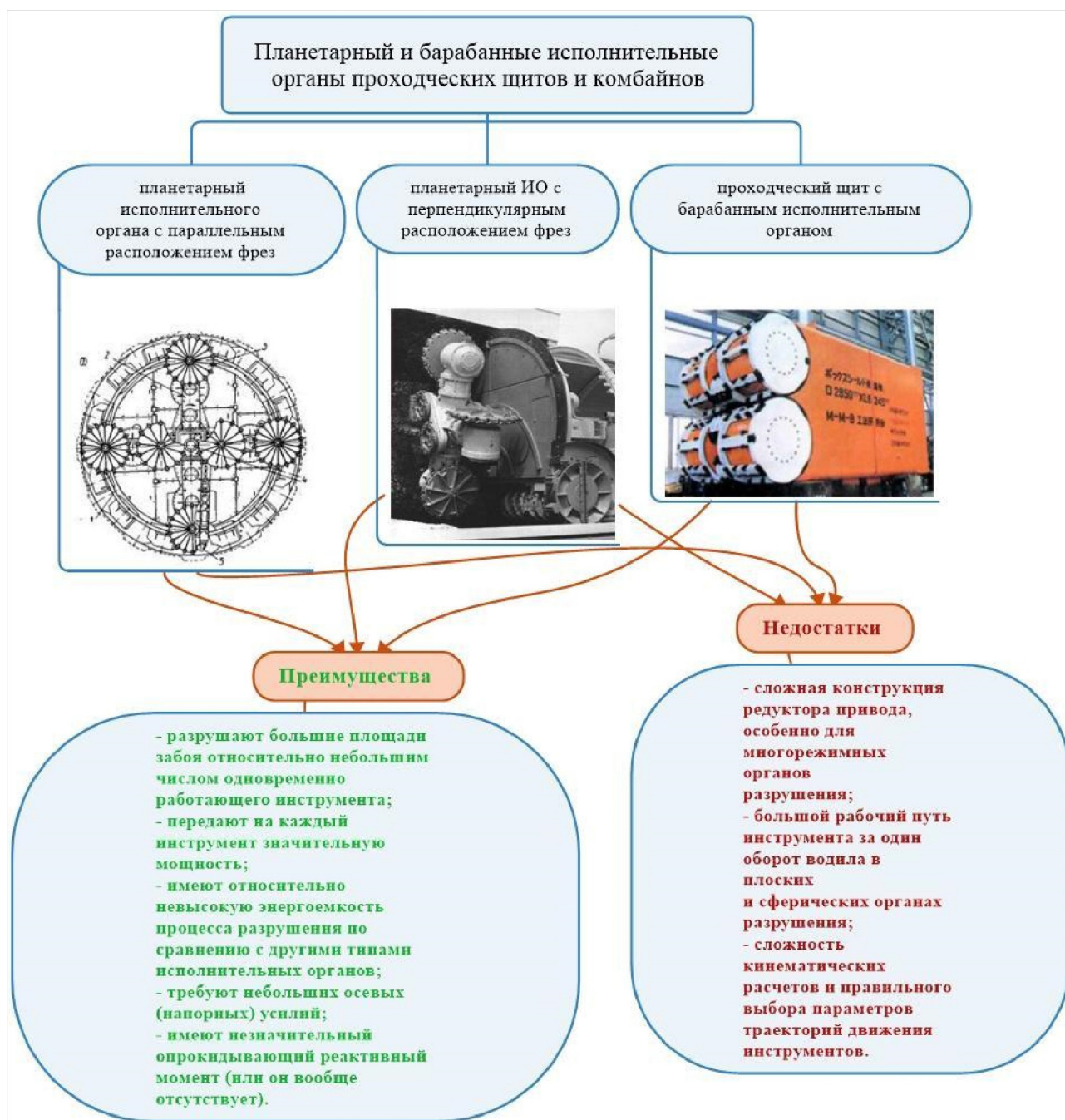


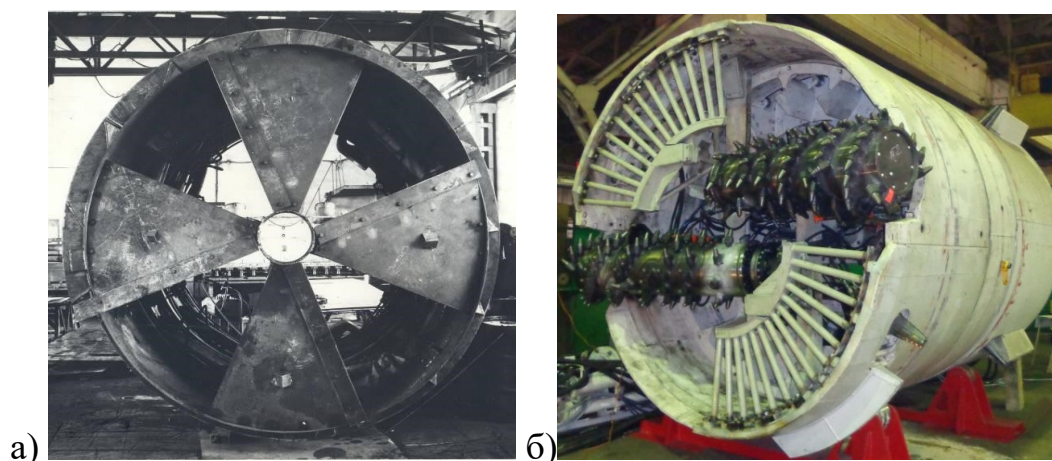
Рисунок 1.6 – Преимущества и недостатки планетарных и барабанных ИО проходческих систем

Каждая разновидность ИО имеет свои преимущества и ограничения, и выбор рациональных параметров требует учета конкретных условий эксплуатации и типа горных пород [23-24]. Важно учитывать особенности работы каждого типа для оптимизации процесса проходки и повышения эффективности горных работ.

1.2.2 Исполнительные органы геогодов

Одним из главных компонентов в конструкции геогода является исполнительный орган. Основной функцией ИО является разрушение горной породы. Исполнительные органы проходческих систем не всегда соответствуют особенностям работы геогода. В связи с этим исследование и разработка ИО геогода с наибольшей эффективностью является актуальной проблемой.

При проектировании экспериментальных образцов геогодов «ЭЛАНГ-3» и «ЭЛАНГ-4» были применены ИО: ножевые и барабанные с резцами (рисунок 1.7) [11-13]. Особенности работы геогода определяют специфику конструкции исполнительных органов.



а) НИО, б) барабанный ИО

Рисунок 1.7 – ИО экспериментальных образцов геогодов

По результатам проведенного ряда работ [10-21] разработан опытный образец геогода. Геогод является аппаратом, предназначенным для проведения горных выработок различного направления и предметом производства на машиностроительных предприятиях. В конструкции геогода исполнительный орган является одним из основных компонентов.

На основании проведенного ряда исследований [3, 4, 6, 9, 11-14] были разработаны различные варианты конструкции исполнительных органов геогода. Основные предложенные конструкции исполнительных органов геогодов и их описание приведены на рисунке 1.8.

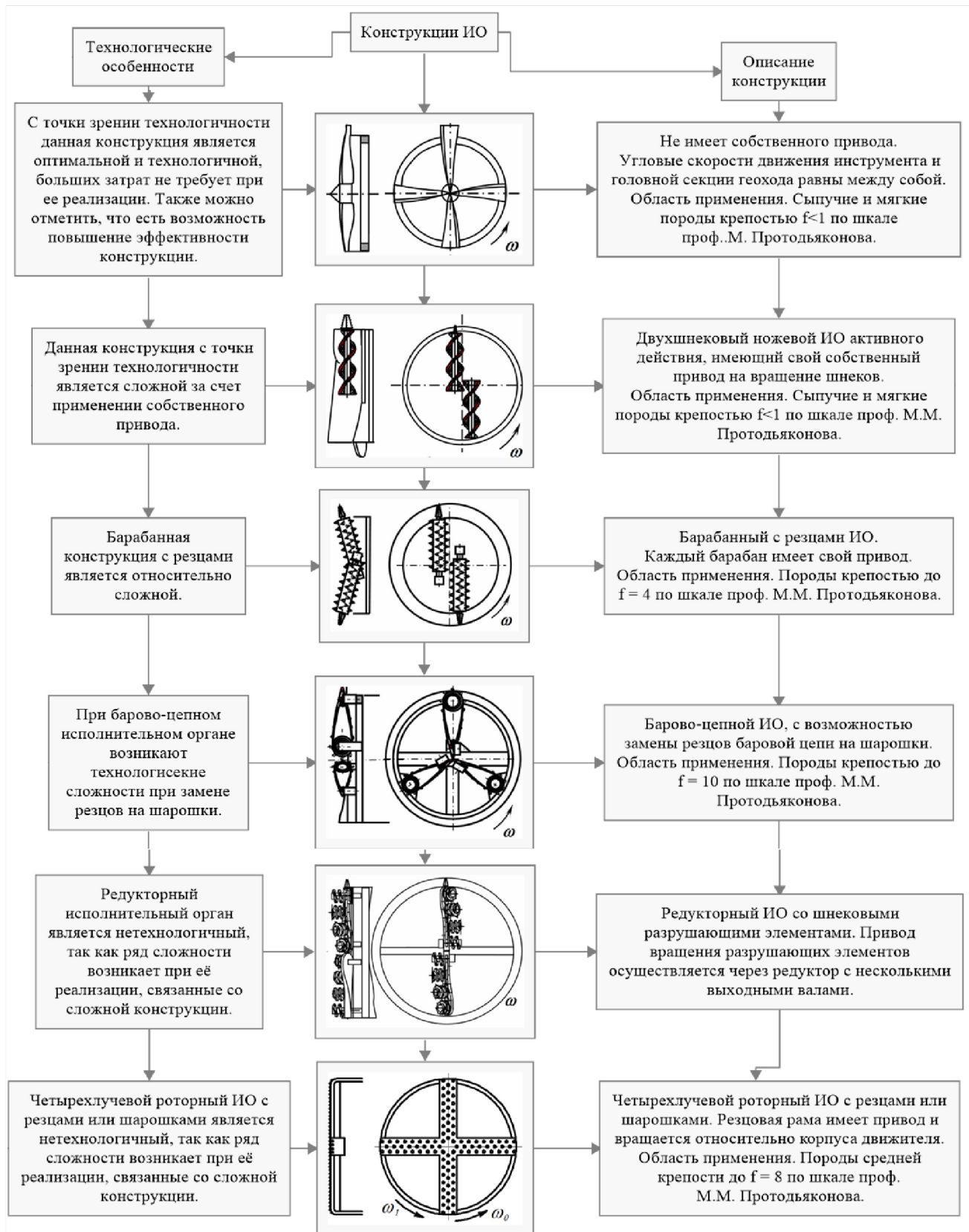


Рисунок 1.8 – Анализ конструкции ИО геоходов

Для реализации функциональных особенностей необходимо выполнять конструкторско-технологические решения процесса создания НИО проходческого агрегата.

1.2.3 Требования к исполнительным органам геохода

Авторами [3, 4, 11-16, 20] был разработан проходческий щитовой агрегат, содержащий цилиндрическую головную секцию с винтовой лопастью и разрушающими исполнительными органами в передней части. Особенность работы НИО геохода заключается в том, что геоход совершает сложные движения и использует саму геосреду для тяги обеспечение движений в продольном направлении. Как отмечается в работах [4, 13], в центральной части оси вращения угол поворота составляет 90° , что может привести к внедрению инструмента в горные породы. Для повышения эффективности процесса разрушения в центральной части рассматриваются различные методы и подходы. Для этого разрабатываются различные конструктивные решения.

Режимы работы агрегата и его условия работы влияют на ряд характеристик НИО геохода. Для обеспечения такого сложного движения проходческого агрегата ножи ИО выполняются с криволинейными поверхностями. Такое конструктивное решение позволит снизить нагрузки на тело ИО.

Из вышесказанного следует сделать вывод, что для НИО необходимо разработать технологию создания сложных поверхностей, используя автоматизированное производство, учитывая уменьшение трудоемкости и металлоемкости, возможность обработки деталей высокопроизводительными методами.

В ряде работ [3, 9, 11-14] рассматриваются конструкции ИО геохода. Разрабатываются конструктивные и функциональные требования, предъявляемые к исполнительным органам, которые учитывают характер перемещения и функционально конструктивные отличия, образование специфической формы забоя, получаемой при работе ИО. Этим вопросом занимались такие авторы как: Аксенов В.В., Ефременков А.Б., Садовец В.Ю., Бегляков В.Ю., Ананьев К.А., Ермаков А.Н., Пашков Д.А. Авторы выделяют следующие функциональные и конструктивные требования к исполнительным органам геохода:

- достаточное обеспечение производительности при любом пространственном расположении геохода в геосреде;
- достаточный доступ к основным элементам ИО для ремонта, замены и модификации;
- взаимозаменяемость и возможность замены ИО на носителе;
- геометрические параметры ИО должны соответствовать с параметрами внешнего движителя;
- полное перекрытие забоя выработки;
- равномерное обеспечение загруженности НИО и толщины срезаемого слоя на разных участках забоя;
- возможность управления ориентацией разрушающих напряжений;
- компактность приводных механизмов ИО;
- низкая энергоемкость разрушения горной породы.

1.2.4 Основные формы ножей исполнительного органа геохода для разрушения мягких пород

При работе НИО геохода формируют геликоидную поверхность. Это поверхность, которая формируется при вращении образующей линии вокруг перпендикулярной к ней оси и одновременно поступательно движущейся этой оси, скорости данных движений пропорциональны. В зависимости от характера движений отличают: прямой геликоид, наклонный геликоид, развертывающийся геликоид.

Для разрушения мягких пород авторами (Аксенов В.В, Садовец В.Ю., Пашков Д.А. [9, 13, 14]) предложены ряд форм конструкции основных элементов ИО. Для обоснования формы отвала НИО необходимо рассмотреть разные конструкции.

Форма отвала и режущих кромок ножа ИО бывает:

- прямая;
- наклонная;

- полувыпуклая;
- выпуклая;
- полувогнутая;
- вогнутая.

Для обоснования формы необходимо проанализировать несколько конструкций и изучить их геометрию. Особенности работы геолода требуют применить геликоидные формы НИО. Геликоидная поверхность формируется в результате прямолинейного движения геолода вдоль неподвижной оси и одновременно вращающегося вокруг этой же оси. Следовательно, периферийные точки радиального ножа, например точка С, которая находится на расстоянии x от оси вращения геолода, как показано на рисунке 1.9, при заданном шаге винтовой лопасти геолода h_v , перемещаются на забой под углом β к плоскости, перпендикулярной оси геолода:

$$\beta = \arctg \frac{h_v}{2 \cdot \pi \cdot x} \quad (1.1)$$

Из формулы (1.1) можно заметить, что угол β ближе к оси вращения является максимальным, а при увеличении расстояния от периферийной точки до оси геолода значение β уменьшается.

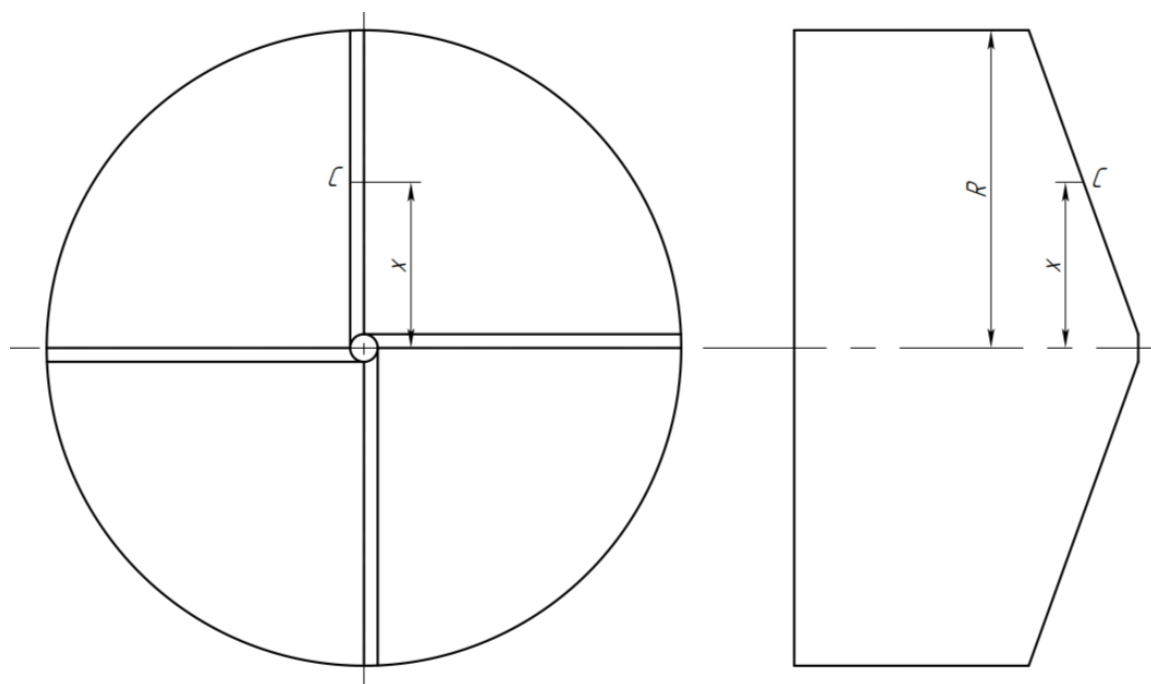


Рисунок 1.9 – Схема НИО геолода

Геликоидная поверхность описывается прямой, вращающейся с постоянной скоростью вокруг неподвижной оси и пересекающей ось под постоянным углом β и одновременно перемещающейся поступательно с постоянной скоростью вдоль этой оси.

Геоход при работе вращается вокруг оси x против хода часовой стрелки с угловой скоростью ω_r , одновременно совершает поступательное движение вдоль этой же оси со скоростью v_r (рисунок 1.10). В развернутом виде за один проход угол поворота будет равен 2π . Угол поворота β будет находиться напротив шага винтового движения и рядом с длиной окружности.

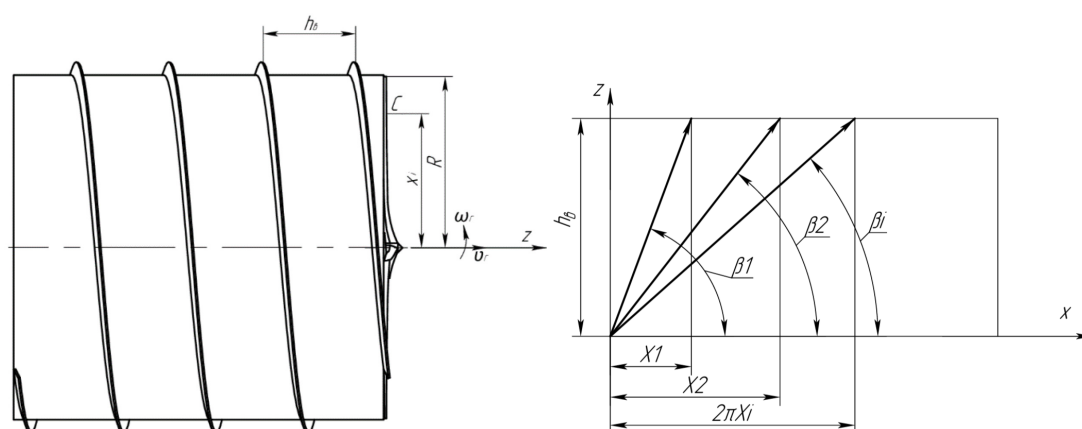


Рисунок 1.10 – Схема движения НИО геохода

В работах [14, 25-29] рассматривается компоновочная схема НИО геохода. Рациональным вариантом конструктивного решения является применение четырех ножей, соединяющихся жестко в центральную часть и корпус головной секции геохода, как показано на рисунке 1.11.

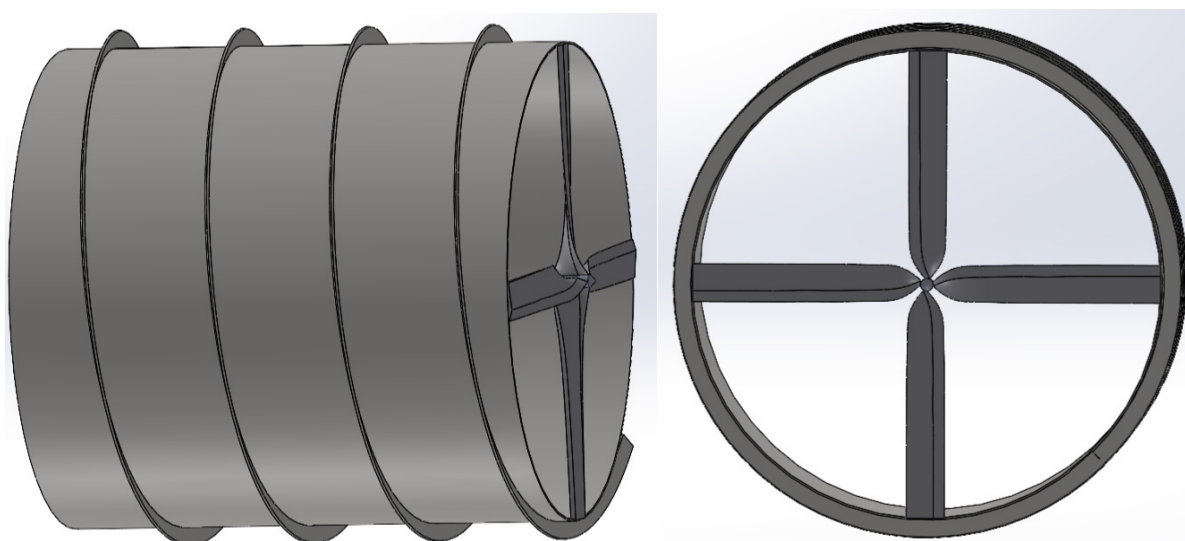


Рисунок 1.11 – Компоновочная схема НИО геохода

Для НИО рассматривается следующая форма, приведенная на рисунке 1.12. Форма в виде прямого геликоида представляет собой сочетание двух сложных криволинейных поверхностей.

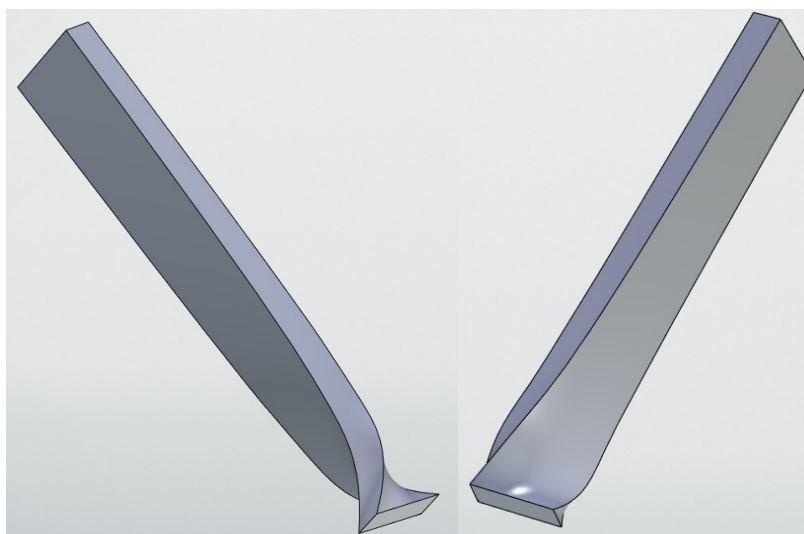


Рисунок 1.12 – Тело ножа прямой геликоидной формы

Следующая форма представляет собой геликоидную поверхность с воронкой (рисунок 1.13).

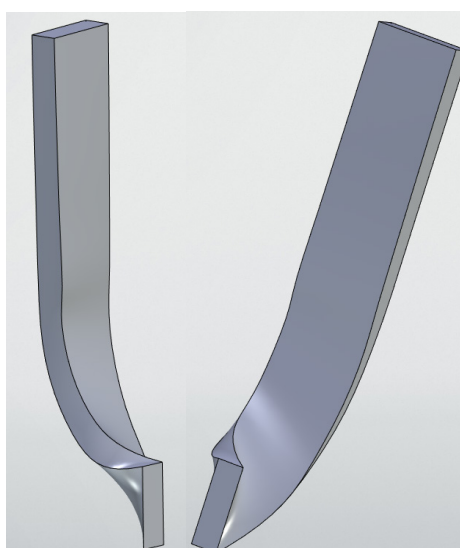


Рисунок 1.13 –Тело ножа геликоидной формы с воронкой

Следующая форма представляет собой геликоидную выпуклую поверхность с воронкой (рисунок 1.14).

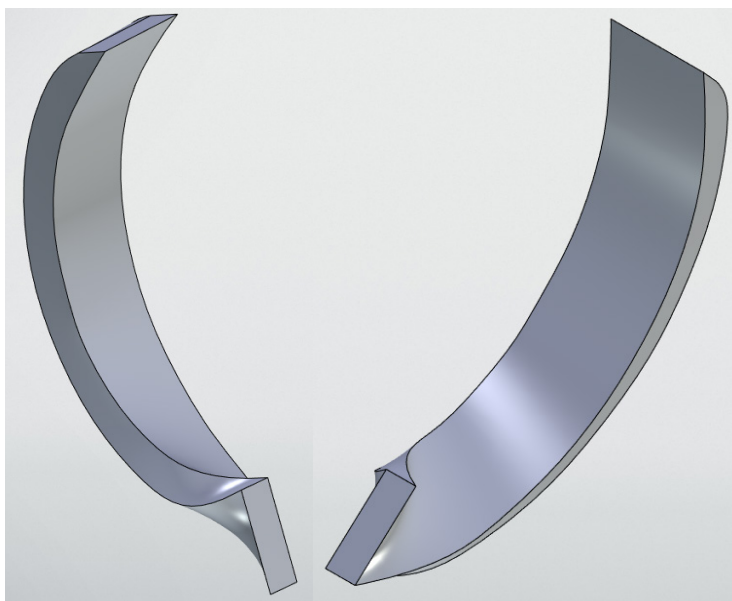


Рисунок 1.14 – Тело ножа выпуклой геликоидной формы (вариант 1)

Выпуклая геликоидная форма ИО геохода выполняется в двух вариантах. Режущая кромка на двух формах представляет собой сложную геликоидную поверхность, а отличием конструкции является верхняя часть формы, где нож соединяется с головной секцией геохода (рисунок 1.15).

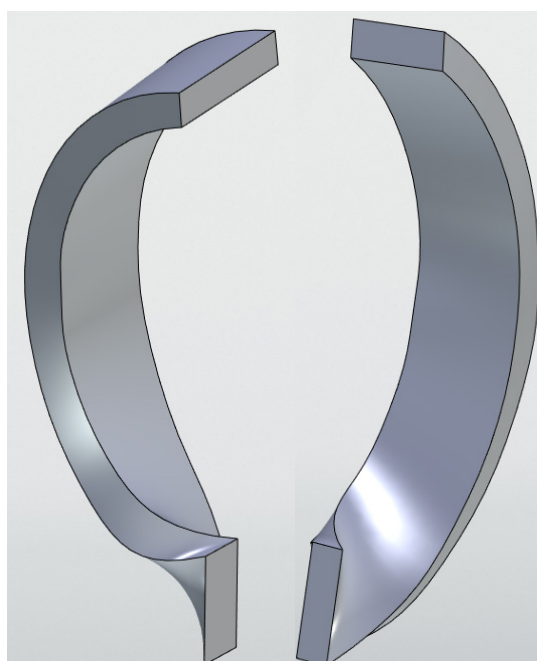


Рисунок 1.15 – Тело ножа выпуклой геликоидной формы (вариант 2)

Таким образом, процесс формообразования основных элементов НИО определяется условиями эксплуатации геохода при разрушении мягких горных пород, а также конструктивными особенностями и функциональными задачами ножей ИО в системе геохода. Эти параметры будут приниматься во внимание при

создании конструктивно-технологических решений для НИО геохода, чтобы обеспечить эффективность его работы.

1.3 Обзор конструкторско-технологических решений в разработке инструментов горнопроходческих систем

При разрушении мягких пород в разных сферах применяются разные варианты инструментов для эффективного разрушения. Изучая ряд работ и источников [30-37], рассматриваются более подробно конструкции и технологические особенности этих механизмов.

Одним из рассматриваемых инструментов является лемех плуга, который существует в нескольких вариантах конструкций с различными формами и наклонами рабочих поверхностей. Для его создания применяются процессы вырубki и штамповки, а также термическая обработка или наплавка. Износостойкость лемеха достигается благодаря использованию специальных сталей, таких как Л55 или Л65, с закалкой и отпуском при температуре 350 °С, что обеспечивает твердость до 33 HRC. Для повышения износостойкости также применяется наплавка сплавом с содержанием корунда.

Другим важным элементом является отвал плуга, который имеет криволинейную поверхность, крепящуюся к корпусу плуга. Его производство требует соблюдения шероховатости поверхности не более 2,5 мкм и включает в себя вырубку, штамповку и термическую обработку. В качестве материала используется листовая сталь различных марок, таких как 65Г и 09Г2С, которые подвергаются закалке при температуре 120-150 °С.

Пропеллер или воздушный винт, представляющий собой лопастной движитель, изготавливается из полимерных композиционных материалов. Его конструкция формируется пакетами препрега в пресс-форме с аэродинамическим контуром, при этом укладка слоев осуществляется с использованием стеклотенты под давлением.

Импеллеры и шнекоцентробежные колеса характеризуются сложной объемной формой и изготавливаются методом литья по выплавляемым моделям с последующей механической обработкой. Рекомендуется также применение аддитивных технологий. Эти детали должны быть выполнены из жаропрочных и коррозионностойких сталей, таких как 03X11H8M2ФЛ и алюминиевые сплавы.

Крупногабаритные винтовые поверхности гидротурбины также имеют сложную форму и производятся с использованием земляных форм. Проверка точности осуществляется с помощью шаблонов, соответствующих теоретическим профилям. Лопasti изготавливаются из нержавеющей сталей, обеспечивающих высокое качество и точность производства.

Обзор конструкторско-технологических решений основных инструментов для разрушения мягкой породы показывает, что в качестве альтернативного варианта следует рассматривать следующие способы создания: литье; традиционные методы обработки давлением (штамповка, ковка); прокат; аддитивные технологии.

Разработка конструкторско-технологических решений для создания инструментов, предназначенных для разрушения мягких пород, предполагает использование разнообразных методов обработки. Каждый из этих методов обладает своими уникальными характеристиками и преимуществами, что позволяет выбрать наиболее подходящий вариант в зависимости от специфики эксплуатации инструмента и требований к его конструкции. Проведя анализ существующих решений в области создания таких инструментов, следует выделить следующие способы получения и рассматривать их преимущества и недостатки, которые приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные способы создания инструментов для разрушения мягкой породы

Способы создания	Преимущества	Недостатки
Штамповка	– высокая прочность и износостойкость инструментов, что критично для породоразрушающих инструментов; – минимизация отходов материала, что повышает экономическую эффективность производства; – быстрое создание больших партий инструментов, что важно для массового производства.	– ограничения по формам и размерам затрудняют создание сложных и уникальных изделий; – необходимость в специализированном оборудовании, которое может быть дорогостоящим в установке и обслуживании; – ограничения по используемым материалам.
Литье по выплавляемым моделям	– технология позволяет создавать инструменты со сложными геометрическими формами, что важно для оптимизации их работы; – данный метод литья экономически выгоден при производстве небольших партий инструментов, так как не требует создания дорогостоящих пресс-форм. – технология позволяет использовать различные металлы и сплавы для создания породоразрушающих инструментов, что важно в зависимости от требований к прочности и износостойкости.	– создание моделей для литья по выплавляемым моделям может быть дорогостоящим процессом, особенно если требуется высокая точность и сложные формы; – литье по выплавляемым моделям имеет ограничения по размерам и толщине деталей, что может быть проблематично для крупных породоразрушающих инструментов; – время на изготовление и обработку моделей.
Литье в земельной форме	– литье в земельной форме часто более экономично, чем другие методы литья, особенно при производстве больших партий инструментов; – возможность создания крупногабаритных деталей; – литье в земельной форме обеспечивает высокую производительность благодаря возможности одновременного формования нескольких деталей.	– ограничения по сложности формы; – после литья в земельной форме детали могут требовать дополнительной обработки и отделки для достижения требуемых характеристик. – ограничения по материалам.
Прокат с последующей вырезкой на портальной установке и механической обработке	– высокая точность и повторяемость изделий; – возможность обработки различных материалов; – эффективное использование материала благодаря оптимизации раскроя; – быстрая смена инструмента для обработки различных деталей.	– высокая стоимость оборудования и его обслуживания; – ограниченные возможности по обработке сложных форм и изделий больших размеров; – ограниченная производительность по сравнению с другими способами.
Послойное спекание в форме детали предварительно добавленного порошкообразного металлического материала лазерным лучом	– высокая точность и возможность создания сложных геометрических форм, включая внутренние полости и каналы. – возможность использования различных металлических материалов, в том числе высоколегированных и термостойких сплавов. – минимальные отходы материала благодаря его добавлению по слоям, что способствует экономии сырья. – возможность быстрой переналадки для производства различных деталей.	– высокая стоимость оборудования и его обслуживания; – ограниченные размеры изготавливаемых деталей из-за ограничений по размерам рабочей камеры; – возможность возникновения дефектов и внутренних напряжений в деталях из-за процесса теплового воздействия лазерного луча; – необходимость контроля качества каждого слоя и дополнительной обработки детали после изготовления.
Образование изделия добавлением в зону расплава порошкообразного металлического материала (DED метод).	– возможность создания крупных и сложных деталей с использованием различных металлических материалов. – возможность восстановления изношенных или поврежденных деталей путем добавления нового материала. – высокая точность и возможность создания сложных геометрических форм, включая внутренние полости и каналы.	– ограниченная скорость производства из-за необходимости добавления материала постепенно и последующей тепловой обработки; – возможность возникновения дефектов и внутренних напряжений в деталях из-за процесса теплового воздействия; – высокие требования к оборудованию и его обслуживанию.

Далее рассматриваются основные способы получения заготовок при производстве основных элементов ИО при разрушении мягких пород. В таблице

1.2 представлены различные технологии обработки давлением, их особенности и возможности применения при создании НИО геохода.

Таблица 1.2 – Выбор технологии обработки давлением при создании НИО геохода

Технология получения заготовки	Особенности технологии	Возможности применения при производстве НИО геохода
Прокат	Прокатный метод является одним из методов получения заготовок в машиностроении. Он используется для создания заготовок из металлических полос или проволоки путем их прокатывания через специальные валки. Прокатный метод позволяет получить заготовки с определенной формой и размерами, а также может использоваться для изменения свойств материала, например его твердости или плотности. Этот метод широко применяется в производстве различных деталей, таких как листовые металлические заготовки, проволочные изделия и трубы.	Рекомендуется
Ковка	При ковке металл нагревается до определенной температуры и затем подвергается давлению или удару для придания ему нужной формы. Ковка позволяет создавать детали с высокой прочностью и стойкостью к износу, так как процесс ковки уплотняет структуру металла и улучшает его механические свойства. Ковка широко используется в производстве различных деталей, включая оси, шатуны, зубчатые колеса и другие изделия, требующие высокой прочности и точности формы.	Не рекомендуется
Холодная объемная штамповка	Данный метод получения заготовки в основном используется для деталей простой формы массой 2250 т. При холодной штамповке в основном используются достаточно пластичные материалы, такие как алюминий, медь, цинк и некоторые малоуглеродистые стали.	Рекомендуется
Холодная листовая штамповка	Преимущества холодной листовой штамповки включают высокую точность, возможность производства сложных форм и экономию материала. Этот процесс также позволяет производить детали с высокой прочностью и долговечностью, но холодная листовая штамповка предназначена для заготовки с толщиной до 4 мм.	Не рекомендуется
Горячая объемная штамповка	Горячая объемная штамповка позволяет создавать сложные и точные детали с высокой прочностью и долговечностью. Этот процесс широко используется в автомобильной, авиационной, энергетической и других отраслях промышленности, где требуются высококачественные металлические компоненты. Технология горячей объемной штамповки является более затратным методом получения заготовки по сравнению другими технологиями.	Не рекомендуется

Таким образом, следует отметить, что конструкторско-технологические решения для создания механизмов разрушения мягких пород зависят от конструктивных особенностей изделия органа геохода с учетом особенностей его работы и условий эксплуатации.

1.4 Выбор метода анализа и принятий решений

Для обоснования наилучшего варианта схемных решений НИО геохода с учетом особенностей конструкции и условий эксплуатации агрегата необходимо провести анализ схемных решений по определенным критериям. Для решения данной задачи необходимо выбрать и применить конкретный метод анализа при принятии решений. Одним из таких методов является метод многокритериального анализа.

Метод многокритериального анализа (МКА) в технике позволяет оценивать и выбирать предпочтительные решения при наличии нескольких конфликтующих критериев, таких как стоимость, надежность, производительность и экологические показатели. В инженерии и производстве МКА помогает в принятии решений при разработке новых устройств, выборе материалов, оптимизации производственных процессов и оценке рисков [31]. Одним из основных преимуществ применения МКА является возможность систематизации и формализации процесса принятия решений, что делает его более прозрачным и обоснованным. Этот метод включает в себя множество подходов и алгоритмов, таких как ELECTRE, TOPSIS, PROMETHEE и другие, каждый из которых имеет свои особенности и сферы применения [31].

Метод многокритериального анализа ELECTRE II является одним из наиболее распространенных и эффективных подходов для решения задач многокритериального выбора [38-42]. Этот метод основан на сравнении альтернатив на основе множества критериев с учетом их взаимосвязей и нечеткости. В рамках ELECTRE II используются две основные стадии: сначала выполняется оценка предпочтений между попарно сравниваемыми альтернативами, а затем осуществляется построение рейтинга на основе доминирования и взвешивания критериев.

Ключевым аспектом метода является использование граничных значений, что позволяет учитывать не только абсолютные значения критериев, но и относительные различия между альтернативами. Это делает ELECTRE II

подходящим для сложных задач, где необходимо учитывать как количественные, так и качественные параметры.

Алгоритм метода ELECTRE II:

1. Пусть $C = \{c_i\}$ – множество оцениваемых критериев, $A = \{a_i\}$ – множество потенциальных вариантов решений. Значение i -го критерия j -й альтернативы представлены как x_{ji} .

2. Для каждого критерия назначаются коэффициенты веса $w_1, w_2, w_3, \dots, w_m$.

3. На следующем этапе определяются индексы согласия и несогласия.

Для расчета индексов согласия множество критериев разбивают на три группы для каждой пары альтернатив:

$I_{jk}^+ = \{i \in I | x_{ji} > x_{ki}\}$ – множество критериев, по которым j -я альтернатива лучше k -й;

$I_{jk}^= = \{i \in I | x_{ji} = x_{ki}\}$ – множество критериев, по которым j -я альтернатива равна k -й;

$I_{jk}^- = \{i \in I | x_{ji} < x_{ki}\}$ – множество критериев, по которым j -я альтернатива хуже k -й [7].

В методе ELECTRE II формула расчета индекса согласия выглядит следующим образом:

$$c_{jk} = \frac{\sum_{i \in I_{jk}^+} w_i}{\sum_{i \in I_{jk}^-} w_i} \quad (1.2)$$

Индекс несогласия для каждой пары альтернатив находится по формуле [8]:

$$d_{jk} = \max_{i \in I_{jk}^-} \left| \frac{l_k^i - l_j^i}{L} \right|, \quad (1.3)$$

где l_k^i, l_j^i оценки пары альтернатив; L – максимальное значение балльной шкалы.

4. На последнем этапе строится разрешающее правило. На основе чисел $p \in (0; 1]$ и $q \in [0; 1)$ строится бинарное отношение, j -я альтернатива считается лучше k -й, когда $c_{jk} \geq p$ и $d_{jk} \leq q$.

1.5 Выводы

1. В современных условиях геоходостроения наблюдается растущий интерес к созданию эффективных НИО для разрушения мягких пород. Несмотря на наличие различных исследовательских разработок, все еще отсутствует единое представление о рациональных параметрах НИО, что усложняет их применение на практике. В связи с этим проведение исследований, направленных на определение эффективных параметров ИО геохода для разрушения мягких пород, приобретает особую актуальность.

2. Для обоснования рациональных параметров НИО геохода помимо функционально-конструктивных требований необходимо учитывать эксплуатационные требования, связанные со способом создания конструкции, сборки и взаимодействия с породой, эффективностью работы изделия, а также с условиями эксплуатации, включая возможность быстрой замены и ремонта компонентов в ограниченных подземных условиях.

3. Для выявления наилучшего выбора вариантов схемных решений ИО органа с учетом эксплуатационных требований применяется метод многокритериального анализа ELECTRE II.

4. Проведенный обзор существующих способов создания исполнительных и рабочих органов проходческих машин позволил выявить особенности технологии и конструктивные решения, определить цели и задачи дальнейшего исследования.

Цель диссертационного исследования – обоснование рациональных параметров НИО геохода для разрушения мягких пород.

Для достижения этой цели следует выполнить ряд задач:

1. Разработать и проанализировать схемные решения ножевых исполнительных органов геохода с учетом требований, предъявляемых к ним.

2. Разработать математическую модель формирования геликоидной формы ножей исполнительного органа геохода.

3. Обосновать рациональные параметры ножевых исполнительных органов геохода, включая конструктивные, силовые и технологические аспекты.

2 РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ НОЖЕВОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГЕОХОДА С УЧЕТОМ ЕГО УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ

Для решения поставленной задачи необходимо:

- разработать схемные решения ножевых исполнительных органов геохода и его элементов с учетом предъявляемых к ним требований и особенностей работы геохода;
- усовершенствовать математическую модель взаимодействия ножей геликоидной формы с затупленной режущей кромкой исполнительных органов геохода с породой забоя;
- провести анализ схемных решений ножевых исполнительных органов геохода на соответствие предъявляемым к ним требованиям.

2.1 Формирование эксплуатационных требований к ножевому исполнительному органу геохода

В п. 1, 2, 3 рассмотрены основные требования к ИО геохода.

При разработке схемных и конструктивных решений для отвалов НИО геохода необходимо учитывать эксплуатационные требования при создании геохода для обеспечения эффективной работы механизма. При правильном подходе к проектированию и учете всех необходимых параметров можно создать высококачественные надежные НИО, которые будут отвечать предъявляемым к ним требованиям. Таким образом, необходимо дополнить следующие эксплуатационные требования для разработки схемных и конструктивных решений НИО геохода:

1. Обеспечение надежности конструкции и ее функционирования: основные элементы НИО геохода должны быть созданы из материалов, обеспечивающих выполнение функции с заданным сроком эксплуатации.

2. Обеспечение эффективности работы НИО: ножи исполнительных органов геохода должны быть спроектированы и созданы таким образом, чтобы обеспечивать долговременное сохранение остроты режущей кромки, учитывая влияние технологий на всех этапах производства и эксплуатации.

3. Обеспечение условий эксплуатации, транспортабельности, возможности замены и ремонта: ножевые исполнительные органы геохода должны быть разборными на части в ограниченных подземных условиях для минимизации времени простоя и обеспечения непрерывной работы проходческого агрегата, а также проведения ремонтных работ без необходимости замены всего узла, при этом эти требования должны быть обеспечены применением различных технологических решений.

Для реализации конструктивных и функциональных особенностей ИО необходимо учитывать эксплуатационные требования при создании основных элементов НИО геохода, а именно требования к отвалам и к режущей кромке ножей. Для формирования технологии создания геликоидной формы ножа ИО необходимо учитывать ряд возможностей получения заготовок, методы обработки основных элементов НИО геохода.

Под эксплуатационными требованиями к НИО понимаются свойства конструкции, которые обеспечивают эффективные способы получения заготовки, создания, ремонта и технического обслуживания изделия с учетом заданных условий работы геохода.

Исходя из особенности и специфики работы геохода (п. 1, 2, 3), условий реализации НИО, технологических возможности создания основных элементов можно сформулировать общие требования при создании его НИО:

1. Компоновка ножей должна представлять собой сочетание простых и несложных геометрических форм, которые обеспечивают удобную, надежную базу для установки заготовки в процессе ее обработки и сборки.

2. Требуемые качественные показатели, такие как точность и шероховатость поверхностей НИО, должны быть обоснованы его функциональным и служебным назначением.

3. Отливные заготовки для основных элементов НИО геохода должны иметь очень близкую и схожую конфигурацию к готовым изделиям. Конфигурация ИО должна иметь минимальные припуски на обработку и малую шероховатость поверхности. Методом литья заготовка должна иметь простое внешнее очертание и минимальное число внутренних лопастей. Литейные заготовки основных элементов должны обеспечивать направленное затвердевание металла и достаточную сопротивляемость ударным и термическим напряжениям, также иметь стенки с оптимальной толщиной, удовлетворяющие условиям заливки металла в соответствии с выбранным способом литья. Отливки должны обеспечивать технологичность моделей, также возможность создания, использования простых и доступных технологических приспособлений.

4. Для получения заготовки основных элементов НИО геохода с геликоидными поверхностями не рекомендуется применять ковку. Ковка рекомендуется для получения заготовки, имеющей простую и симметричную форму.

5. Для применения метода штамповки получения заготовки основных элементов НИО необходимо обеспечить возможность заготовки свободного извлечения из штампа, не допустить острых углов по условиям горячей штамповки, форма ножей не должна вызывать боковое смещение штампов.

Таким образом, эксплуатационные требования позволяют сформулировать определенные критерии для оценки конструкторско-технологических решений по созданию основных элементов геликоидной формы НИО, которыми являются:

- металлоемкость,
- технологическая себестоимость.

Существуют разные способы оценивания металлоемкости при создании сложных деталей. Один из таких подходов – это расчет коэффициента использования материала:

$$K_{\text{им}} = \frac{m_{\text{д}}}{m_{\text{заг}}}, \quad (2.1)$$

где $m_{\text{д}}$ – масса изделия, $m_{\text{заг}}$ – масса заготовки.

Технологическая себестоимость включает в себя затраты на сырье, энергию, оборудование, трудовые ресурсы и другие производственные издержки. Она может быть рассчитана как сумма всех затрат, связанных с процессом создания изделия, поделенная на количество произведенных заготовок. Таким образом, технологическая себестоимость заготовок зависит от множества факторов, включая объем производства, качество сырья, эффективность оборудования и уровень оплаты труда. Для упрощения расчетов будет использована следующая формула:

$$T_c = \frac{m_d}{K_{им}} \cdot (C_{заг} + C_c \cdot (1 - K_{им})), \quad (2.2)$$

где $C_{заг}$ – стоимость 1 кг материала заготовки, C_c – стоимость срезания 1 кг стружки при механической обработке в среднем по горному машиностроению.

2.2 Элементы ножевого исполнительного органа геохода

Основными компонентами этого НИО геохода являются отвал (тело), ножи, элементы соединения, а также центральная часть, которая обычно выполняет функцию ножа. Каждый из этих элементов обладает особыми техническими характеристиками и конструктивными особенностями, позволяющими обеспечивать эффективную работу геохода в условиях подземных работ.

Отвал исполнительного органа представляет собой основной рабочий элемент, созданный из прочного материала, способного выдерживать большие механические нагрузки и воздействие окружающей среды. Ножи – это рабочие части, непосредственно взаимодействующие с породой забоя, они выполняют функцию резки, разрушения или перемещения соответствующего слоя.

Элементы соединения обеспечивают надежное крепление ножа к основной конструкции и позволяют передавать усилия, а также обеспечивают возможность замены изношенных частей без необходимости полного демонтажа всего устройства. Центральная часть, или нож, играет важную роль в формировании рабочей поверхности и влияет на эффективность выполнения технологического процесса.

Далее подробно рассматриваются геометрические параметры поперечного сечения ножа, которые существенно влияют на его функциональные свойства и долговечность. Исходными данными для определения геометрических параметров поперечного сечения режущей кромки ножа являлись: угол заострения с точки технологии разрушения мягких пород; угол резания при разрушения мягкой породы; ширина ножа.

Необходимо определить геометрические параметры поперечного сечения, такие как передний угол резания, допустимые значения углов наклона передней поверхности ножа, линейные размеры наклона передней и задней поверхности ножа в поперечном сечении. В качестве исходных данных для определения геометрических параметров также рассматриваются формы ножа ИО геохода. На рисунке 2.1 приведено тело ножа ИО в виде прямой геликоидной формы.

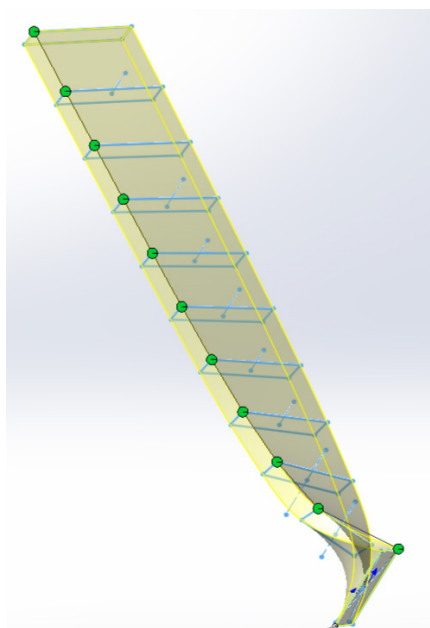


Рисунок 2.1 – Профиль ножа прямой геликоидной формы

Для создания основных элементов НИО и дальнейшей эксплуатации его в условиях подземных выработок необходимо обосновать геометрические параметры режущей кромки ножа. Прочностные свойства зависят от геометрических параметров тела и режущей кромки, механических свойств материалов, точности и качества обработки материалов и условий эксплуатации.

В работах [9, 26] рассматривается методика построения геликоидной формы тела ножа ИО геохода. Также в другой работе [29] рассматриваются различные

геометрии сечения ножа ИО при различных углах наклона. Для обоснования геометрических параметров профиля сечения ножа ИО учитываются различные условия из теории резания грунтов. Угол резания при разрушении мягких пород задается в определенных значениях, как отмечается в различных источниках [43-48]. Следовательно, определяются геометрические параметры режущей кромки тела ножа ИО геохода для обеспечения его эксплуатационных свойств. Для этого используется новый подход для определения геометрических параметров поперечного сечения ножа ИО геохода. Данный подход заключается в определении переднего угла наклона режущей кромки α_1 и заднего угла режущей кромки α исходя из оптимальных значений угла резания δ и угла заострения ножа ε ИО.

При разрушении мягких пород принятые значения угла резания являются $\delta = 30 \dots 32^\circ$, рекомендуемые значения угла заострения $\varepsilon = 25 \dots 27^\circ$ [43-48]. Определяются такие значения переднего угла наклона режущей кромки α_1 , чтобы принятые значения заднего угла режущей кромки $\alpha = 6 \dots 8^\circ$. На рисунке 2.2 приведена геометрия поперечного сечения ножа ИО геохода.

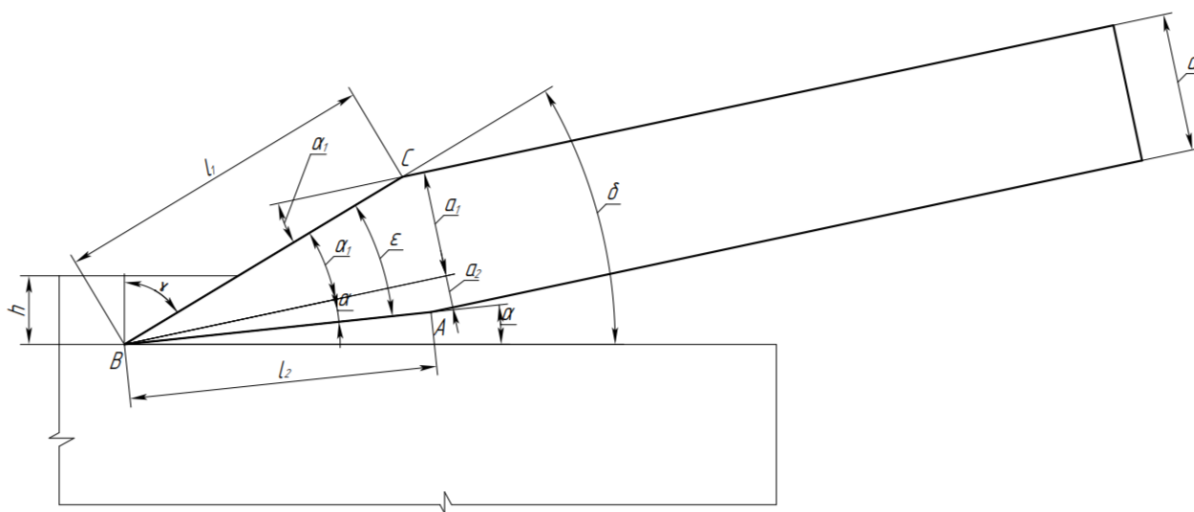


Рисунок 2.2 – Геометрия поперечного сечения ножа ИО геохода

(ε – угол заострения, γ – передний угол ножа, α – задний угол наклона ножа, α_1 – передний угол наклона ножа, δ – угол резания, a_1 , a_2 – линейные размеры, a – ширина ножа, h – толщина среза).

Проведем геометрический анализ параметров сечения ножа ИО. Исходя из данного сечения следует отметить, что:

$$\varepsilon = \alpha_1 + \alpha, \quad (2.3)$$

$$\delta = \varepsilon + \alpha. \quad (2.4)$$

Определение переднего угла:

$$\gamma = 90 - \varepsilon - \alpha. \quad (2.5)$$

Передний угол наклона будет равен:

$$\alpha_1 = \varepsilon - \alpha. \quad (2.6)$$

Для определения зависимости углов наклона ножа задаем принятые значения угла заострения при разных углах резания, так как именно данный параметр определяет прочностные характеристики и степень износостойкости режущей кромки. На рисунке 2.3 приведена зависимость угла заострения от переднего α_1 и заднего α угла наклона при разных углах резания.

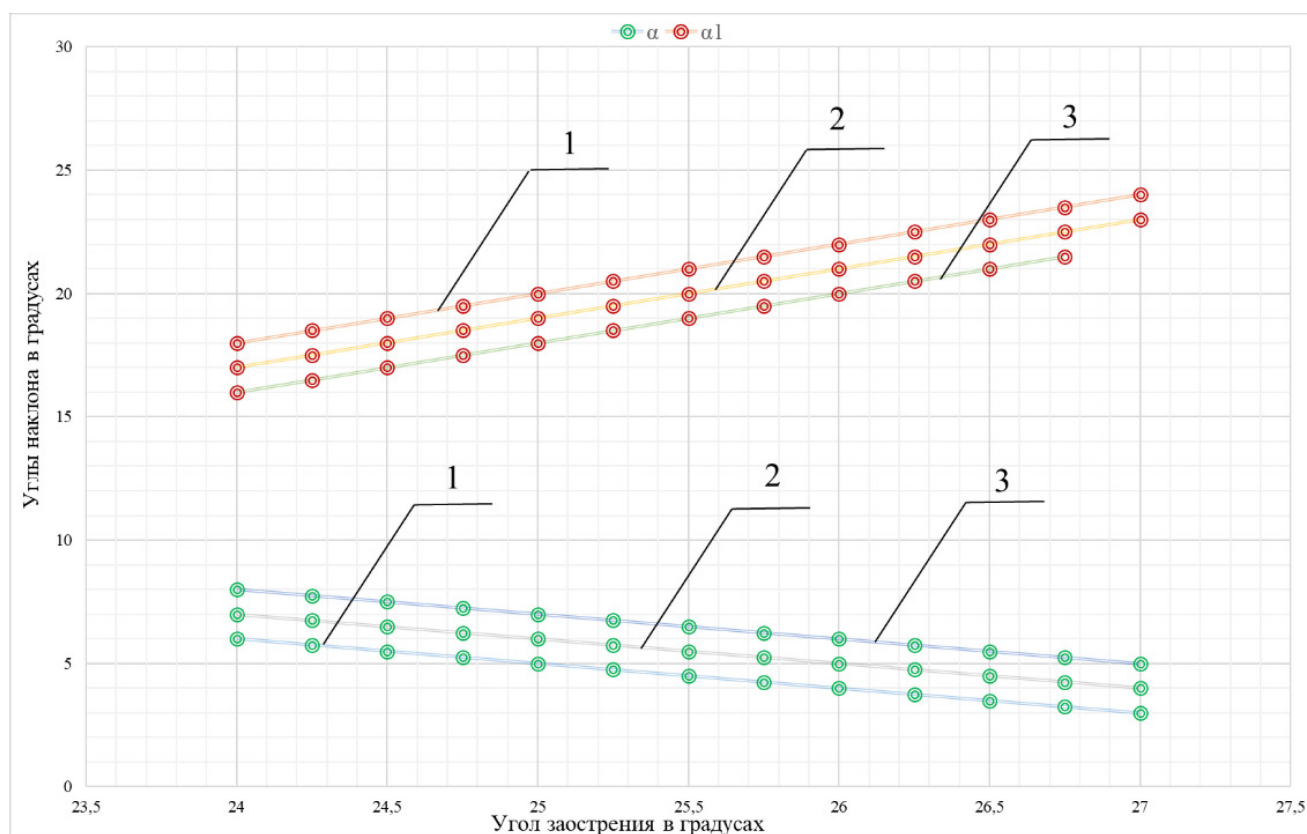


Рисунок 2.3 – Зависимость угла заострения от заднего α угла наклона
(1 – при $\delta=30^\circ$, 2 – при $\delta=31^\circ$, 3 – при $\delta=32^\circ$)

Данные зависимости показывают, что при увеличении значения угла заострения увеличивается значение переднего угла наклона режущей кромки, а

значение заднего угла при этом уменьшается. Расчет значений углов наклона при разных значениях угла резания позволяет определить значение для переднего угла наклона ножа, обеспечивая принятые значения заднего угла наклона. Результаты расчетов углов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения углов сечения ножа и угла резания в градусах

δ	ε	α	γ	α_1
30	24	6	60	18
31	24	7	59	17
	24,25	6,75		17,5
	24,5	6,5		18
	24,75	6,25		18,5
	25	6		19
32	24	8	58	16
	24,25	7,75		16,5
	24,5	7,5		17
	24,75	7,25		17,5
	25	7		18
	25,25	6,75		18,5
	25,5	6,5		19
	25,75	6,25		19,5
	26	6		20

Исходя из данных в таблице 2.1 следует отметить, что передний угол наклона режущей кромки находится в пределах 18-20°, и это соответствует схемам, приведенным в работе [36].

Далее определяются линейные параметры поперечного сечения ножа ИО геохода, которые, соответственно, зависят от вышерассмотренных угловых параметров. Угловые параметры позволяют нам определить в дальнейшем линейные размеры, которые будут использоваться при проектировании тела ножа и моделировании формы режущей кромки.

В различных источниках [43-48], которые касаются конструирования инструментов для разрушения мягкой породы, предлагаются разные варианты: параметры наклона (α_1 и α_2) режущей кромки одинаковы для переднего угла и заднего угла, для заднего меньше, а для переднего больше и так далее. В качестве рационального варианта рассматривается режущая кромка с одинаковыми параметрами наклона, учитывая особенности технологии изготовления ножа геликоидной формы. При этом в дальнейшем будет проводиться исследование

напряженно-деформированного состояния тела ножа, расчет коэффициента запаса прочности.

Для упрощения схемы и расчетов при параметризации формы тела и режущей кромки ножа рассматриваются параметры наклона a_1 и a_2 , которые будут зависеть от толщины ножа a . Исходя из геометрии поперечного сечения ножа, которая приведена на рисунке 2.2, используя теорему синусов для треугольника ABC , следует записать следующие:

$$\frac{a}{\sin \varepsilon} = \frac{l_1}{\sin (90 - \alpha)} = \frac{l_2}{\sin (90 - \alpha_1)} \quad . \quad (2.7)$$

Следовательно, параметры l_1 и l_2 будут равны:

$$l_1 = \frac{a \cdot \sin (90 - \alpha)}{\sin \varepsilon}; \quad (2.8)$$

$$l_2 = \frac{a \cdot \sin (90 - \alpha_1)}{\sin \varepsilon}. \quad (2.9)$$

Параметры a_1 и a_2 будут равны:

$$a_1 = l_1 \cdot \sin \alpha_1 = \frac{a \cdot \cos \alpha}{\sin \varepsilon} \cdot \sin \alpha_1; \quad (2.10)$$

$$a_2 = l_2 \cdot \sin \alpha = \frac{a \cdot \cos \alpha_1}{\sin \varepsilon} \cdot \sin \alpha. \quad (2.11)$$

Полученные уравнения 2.8 и 2.9 показывают зависимость параметров наклона от толщины ножа a , угла резания δ и угла заострения ε . Следует задать разную толщину резания и определить параметры наклона ножа. Ширина ножа зависит от диаметра геолохода, формы тела ножа ИО геолохода и видов нагрузок, которые возникают при работе геолохода. Для геолохода с радиусом 900 мм в работах [26-28] предлагается в качестве рационального варианта ширину ножа принимать 150 мм. Толщина ножа будет влиять прежде всего на параметры наклона режущей кромки и устойчивости самого ножа при возникающих нагрузках. Для ножей землеройно-транспортных машин, таких как скреперы, бульдозеры, грейдеры, согласно ГОСТ 28771-90 (ИСО 7129-89) при ширине 150 мм рекомендуется толщину принимать от 10 до 19 мм. Для геолохода радиусом 900 мм принимается 20 мм и рассчитывается высота наклона, результаты расчета приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Значения угловых и линейных параметров сечения ножа

δ	ε	α	$a_1, \text{мм}$	$a_2, \text{мм}$	$a, \text{мм}$
30	24	6	15,112	4,888	20
31	24	7	14,269	5,731	
	24,25	6,75	14,542	5,458	
	24,5	6,5	14,808	5,192	
	24,75	6,25	15,068	4,932	
	25	6	15,323	4,677	
32	24	8	13,422	6,578	
	24,25	7,75	13,704	6,296	
	24,5	7,5	13,980	6,020	
	24,75	7,25	14,250	5,750	
	25	7	14,515	5,485	
	25,25	6,75	14,774	5,226	
	25,5	6,5	15,028	4,972	
	25,75	6,25	15,276	4,724	
	26	6	15,519	4,481	

Для дальнейшего исследования по полученным значениям углов и линейным размерам поперечного сечения ножа задается геометрия режущей кромки на каждую форму соответственно. При этом параметры выбираются для минимального угла заострения. Значение данного угла влияет на прочностные характеристики режущей кромки, поэтому изначально нож необходимо создать с максимальным значением этого угла, чтобы в дальнейшем при эксплуатации оборудования и замене ножа была возможность заточки режущей кромки.

На рисунке 2.4 представлен профиль ножа ИО геликоидной формы при минимальном угле заострения.

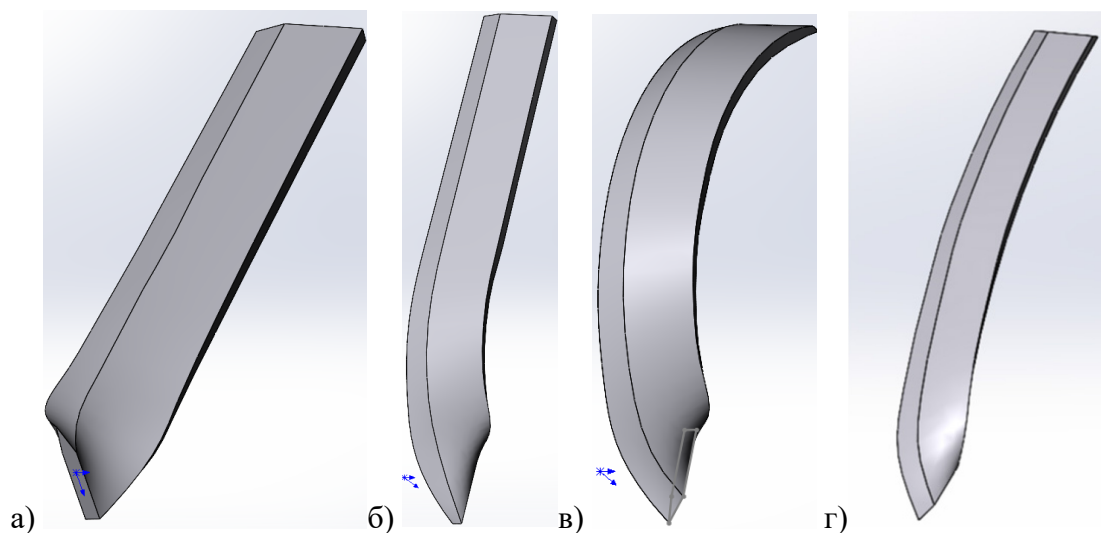


Рисунок 2.4 – Профиль ножа ИО с учетом геометрии режущей кромки

(а – прямой геликоидной формы, б – геликоидной с воронкой, с – выпуклой геликоидной формы, г – полувыпуклой формы)

Для получения заготовки тела ножа ИО геохода предлагается применить легированную высокопрочную сталь 18Х2Н4МА.

2.2.1 Формирование конструктивных требований к каждому элементу НИО геохода

Отвал НИО геохода как основной рабочий элемент должен быть создан с учетом следующих конструктивных требований:

- размеры и форма отвала должны соответствовать конкретным задачам и условиям работы геохода;
- отвал должен быть создан из высококачественного материала, обладать достаточной прочностью и износостойкостью для длительной эксплуатации;
- правильный угол закрутки отвала помогает эффективно срезать и перемещать грунт;
- отвалы должны иметь надежную систему крепления к корпусу геохода для обеспечения стабильности работы;
- отвалы должны быть легко заменяемыми в случае необходимости проведения ремонтных работ или замены изношенных элементов.
- отвалы должны быть спроектированы с учетом долговечности и долгосрочной эксплуатации без необходимости частой замены или ремонта.

При выборе параметров и проектировании отвала НИО геохода будут учитывать все вышеперечисленные характеристики, чтобы обеспечить эффективную работу механизма.

Ножи ИО геохода являются ключевыми элементами для срезания, перемещения и разравнивания пород забоя. Они должны быть спроектированы с учетом следующих конструктивных требований:

- ножи должны быть созданы из высококачественного материала, обладающего высокой прочностью и износостойкостью;

- ножи должны иметь рациональную форму и размеры для эффективного срезания и перемещения породы;
- ножи должны быть острыми и иметь хорошо заточенные режущие кромки для обеспечения эффективного срезания породы без лишнего усилия;
- ножи должны быть надежно закреплены на отвал ИО, чтобы исключить их отвальное падение или смещение в процессе работы;
- ножи должны быть легко заменяемыми при необходимости, удобная система замены позволяет оперативно восстановить конструкцию ИО после износа или повреждений ножей.

2.3 Разработка схемных решений НИО геохода и его элементов с учетом требований, предъявляемым к ним

Схемные решения НИО геохода могут быть разными в зависимости от формы ножа, центральной части и компоновки с учетом различных способов крепления и соединения. Эти аспекты важны для обеспечения эффективности работы геохода в различных условиях, что влияет на его производительность и срок службы. Выбор подходящих схемных решений позволяет определить взаимодействие между элементами и улучшить качество выполняемых операций.

Схемные решения для НИО геохода состоят из следующих решений (дополнение к классификации НИО геохода):

- схемные решения по компоновке, с учетом формы ножей ИО;
- схемные решения по центральной части;
- схемные решения по компоновке НИО с учетом способов закрепления, сборки и соединения с центральной частью.

Далее разрабатываются схемные решения по указанным выше группам. При разработке схемных решений учитываются основные конструктивные требования к элементам НИО геохода, чтобы каждый элемент НИО (отвал и ножи) был выполнен в геликоидной форме (п. 1.2.4). Геликоидная форма, как показано на рисунке 1.4, формируется исходя из условий геохода, и траектория координат точек

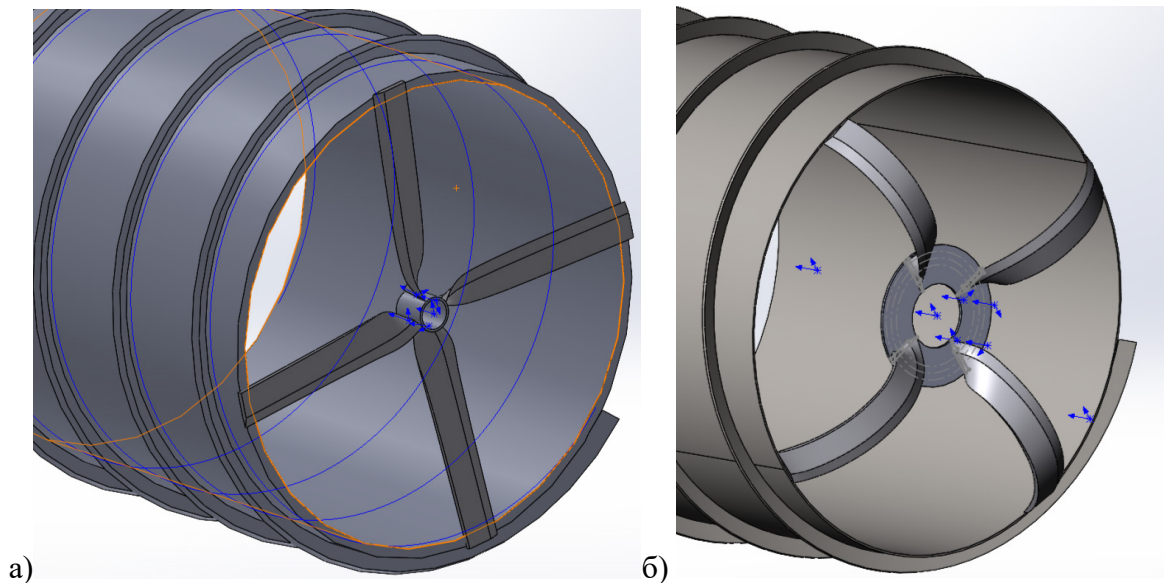
в поперечном сечении основных элементов меняется в зависимости от расстояния от оси вращения геохода до рассматриваемой точки в поперечном сечении.

Схемные решения по компоновке ИО, с учетом геометрических параметров ножей, могут включать различные варианты размещения и формы ножей. Используются схемы с разными углами наклона ножей, что позволит добиться большей эффективности процесса разрушения и уменьшить износ ножей с учетом технологии создания основных элементов НИО геохода.

Учитывая формы ножей, их размещение друг относительно друга, рассматриваются следующие формы режущих кромок:

- прямая геликоидная;
- выпуклая геликоидная;
- геликоидная с воронкой;
- полувыпуклая геликоидная.

На рисунке 2.5 представлены основные схемные решения НИО геохода.



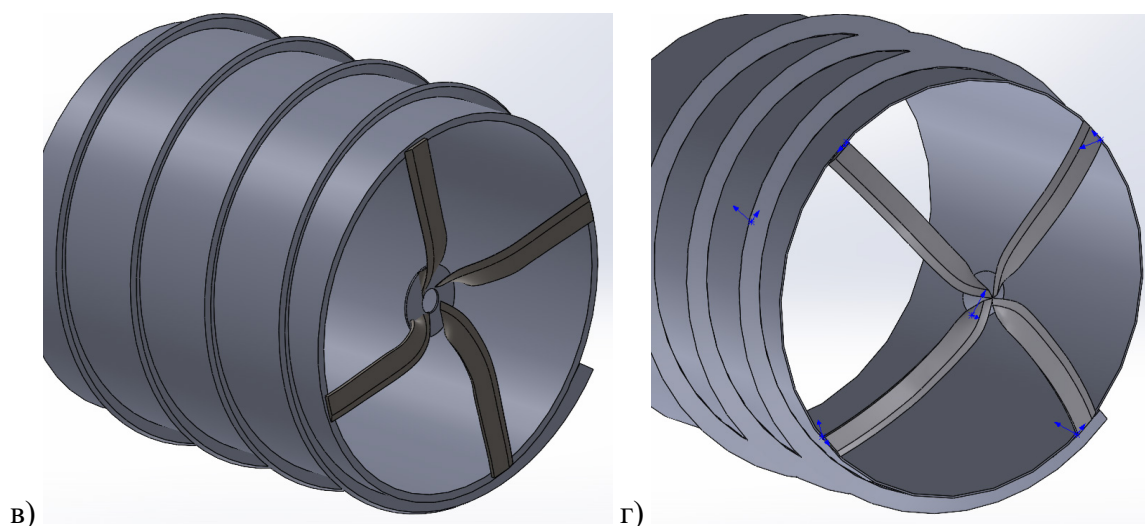


Рисунок 2.5 – Схемные решения по компоновке НИО геохода с различными конструктивными решениями по форме ножа (а – прямая геликоидная форма ножа; б – выпуклая форма ножа; в – геликоидная форма ножа с воронкой; г – полувыпуклая форма ножа)

С точки зрения упрощения конструктивного исполнения, прямая геликоидная форма ножа ИО (рисунок 2.5, а) является более рациональным вариантом. Схемное решение по компоновке НИО с выпуклой формой (рисунок 2.5, б) и геликоидной формой с воронкой (рисунок 2.5, в) в центральной части являются схожими, поэтому конструкции могут иметь одинаковые конструктивные элементы в центре. Как было доказано в работах [9-10], полувыпуклая форма ножа ИО (рисунок 2.5, г) дает возможность увеличить маневренность геохода. Полувыпуклая форма ножа ИО (рисунок 2.5, г) позволяет в центре устанавливать дополнительный конструктивный элемент конусообразной формы для эффективного разрушения пород.

Выбор схемы компоновки по сборке ИО, в зависимости от центральной части, имеет критически важное значение для его эффективности и надежности в процессе работы. Центральную часть следует проектировать с учетом оптимального распределения нагрузки и минимизации износа. Параметры центральной части могут включать длину ножа, угол заточки, тип материала (например, легированная сталь для повышения износостойкости) и геометрию,

позволяющую максимально эффективно отделять породу от массива в центральной части.

Обоснование параметров предполагает анализ требований к работе ИО, условий эксплуатации, а также предполагаемых нагрузок и скоростей работы. Важно также учитывать возможность замены или ремонта ножа, что влияет на общую трудоемкость изготовления и эксплуатацию оборудования, как это показано в работах [34-37].

Таким образом, выбор рациональной схемы компоновки и обоснование параметров центральной части позволяют значительно повысить производительность и срок службы ИО.

Рассмотрены различные схемные решения по конструктивному выполнению центральной части ИО для прямой геликоидной формы (рисунок 2.6).

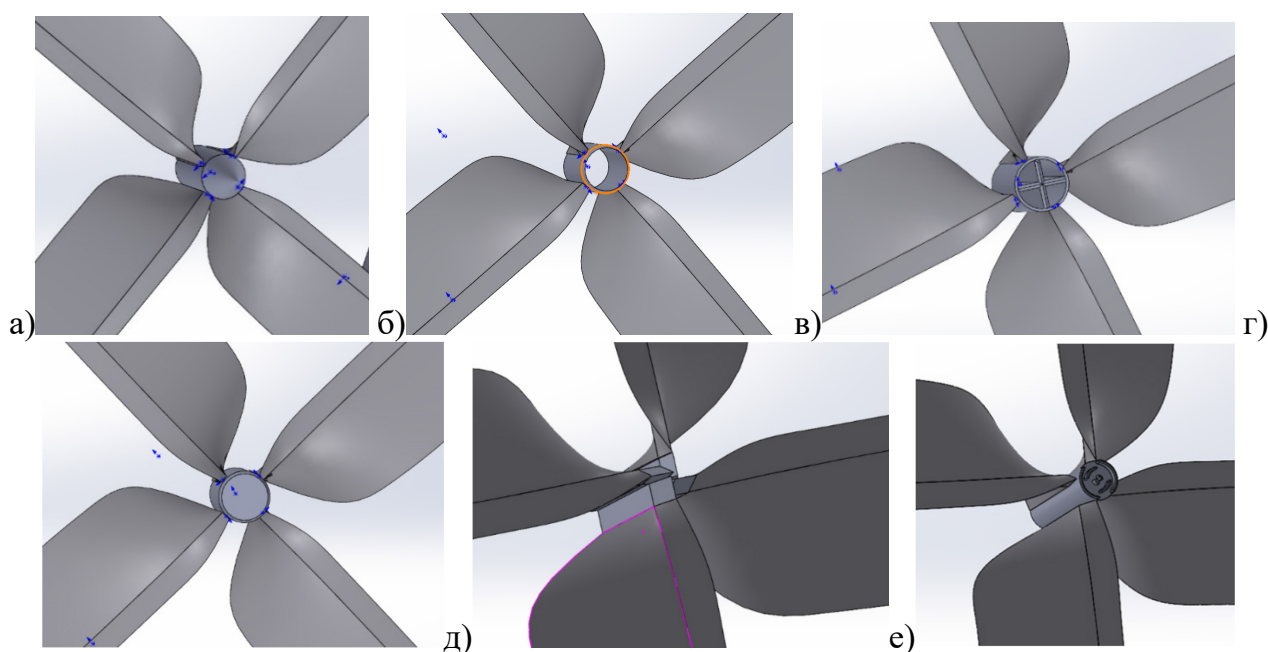


Рисунок 2.6 – Схемные решения по конструктивному исполнению центрального ножа ИО геохода

На схеме (рисунок 2.6, а) представлена центральная часть в виде цилиндрической формы и конечная часть, выполненная в конусообразной форме. Недостатком данной схемы является то, что при изменении угла наклона проводимой выработки возникает ряд сложностей в связи с маневрированием геохода.

Разработана центральная часть ИО в виде кольца (рисунок 2.6, б), которая позволяет соединить отвал ИО в центре, и порода в данном случае в центре будет пропускаться через отверстие.

На рисунке 2.6, в представлена центральная часть в виде инструмента, который состоит из двух пересекающихся между собой прямоугольных элементов с ножами. Разработана схема центральной части ИО из сплошного цилиндрического элемента (рисунок 2.6, г), которая позволяет в центре соединить отвалы НИО геохода, поэтому по данной схеме в центре будет происходить вдавливание породы вперед, что негативно скажется на усилиях подачи.

На схеме (рисунок 2.6, д) разработана центральная часть в виде элементов, которые состоят из прямоугольных ножей, пересекающихся между собой под углом 90° , то есть профиль данных элементов совпадает полностью с сечением ножа, где сечение ножа повернуто на 90° .

Также разработана центральная часть в виде режущего инструмента цилиндрической формы (рисунок 2.6, е), то есть на передней поверхности данного цилиндра расположены режущие элементы для разрушения породы.

Таким образом, на выбор конструктивных решений с учетом центральной части большое влияние оказывает форма отвала и ножа ИО.

Схемные решения по компоновке отвала и ножа ИО геохода включают различные варианты расположения этих элементов. Варианты размещения могут зависеть от типа грунта, условий эксплуатации и требований к производительности [49-50]. Отвал может располагаться в передней части, что обеспечивает легкий доступ к плоскости забоя, в то время как нож может быть установлен на уровне, позволяющем его максимально эффективное взаимодействие с породой забоя. Дополнительные элементы обеспечивают надежную фиксацию ножа и отвала, что важно для их долговечности и надежности в условиях резко меняющейся нагрузки.

С учетом особенностей и функционально-конструктивных требований, предъявляемых к НИО, были разработаны различные схемы по компоновке НИО (рисунок 2.7). При разработке данных схем важным аспектом, который учтен,

является то, что каждая точка в сечении ножа и отвала имеют одинаковые траектории по длине ножа и отвала ИО геохода.

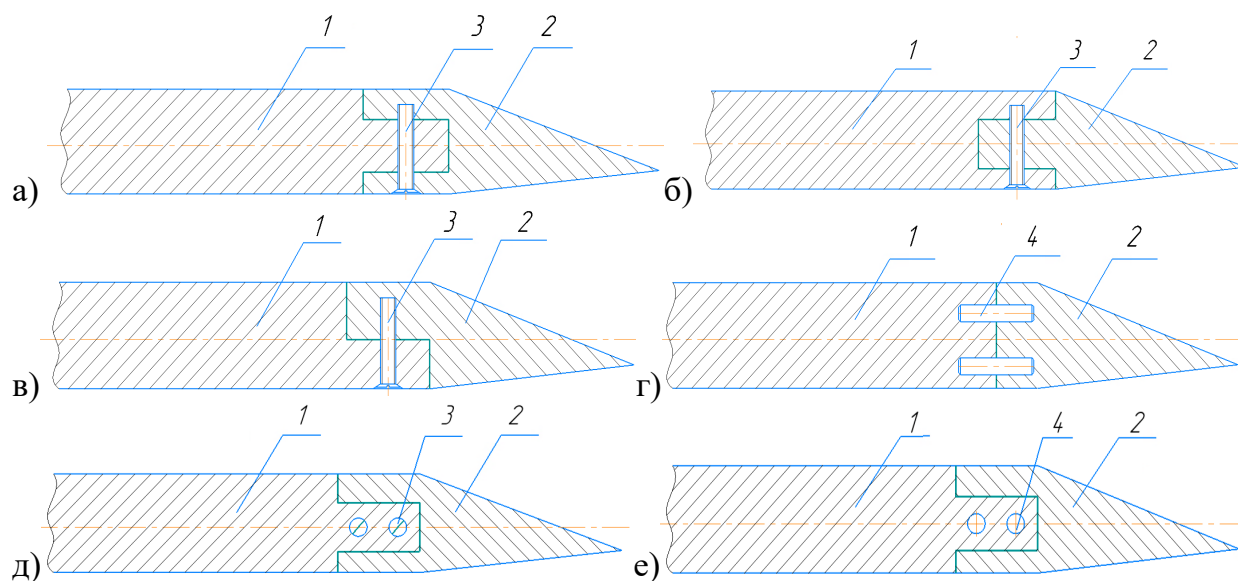


Рисунок 2.7 – Схемные решения по компоновке отвала и ножа ИО геохода
(1-отвал, 2-нож, 3-винт, 4-штифт)

На схеме (рисунок 2.7, а) показано, что нож выполняется с пазом и по данному пазу будет базироваться отвал, при этом закрепление осуществляется винтами со стороны заднего угла наклона ножа. Схема (рисунок 2.7, б) предполагает также выполнить паз только на отвале, базирование и закрепление по схеме (рисунок 2.7, а).

В разработанной схеме (рисунок 2.7, в) предполагается выполнить отвал и нож ИО с уступом, и базирование происходит по данной поверхности. Закрепление будет осуществляться также винтами со стороны заднего угла наклона ножа.

На схеме (рисунок 2.7, г) выполнены отвал и нож ИО, пересекающиеся между собой одной поверхностью, и базирование происходит по этой поверхности, при этом закрепление осуществляется штифтами с натягом.

На схемах (рисунке 2.7, д, е) отвал выполнен с уступом, а нож с пазом. Базирование будет осуществляться по данной поверхности. В данном случае предполагается разделить режущую кромку НИО на определенные сегменты (ножи). По длине отвала необходимо выполнить вырез для осуществления крепления, которое будет перпендикулярно к поверхности, располагающей в

сечении ножа и отвала ИО. На схеме (рисунке 2.7, д) закрепление ножа к отвалу осуществляется винтами, а на схеме (рисунке 2.7, е) штифтами с натягом.

На рисунке 2.8 приведены основные схемные решения по компоновке отвала и ножа ИО с разбиением на сегменты режущей кромки.

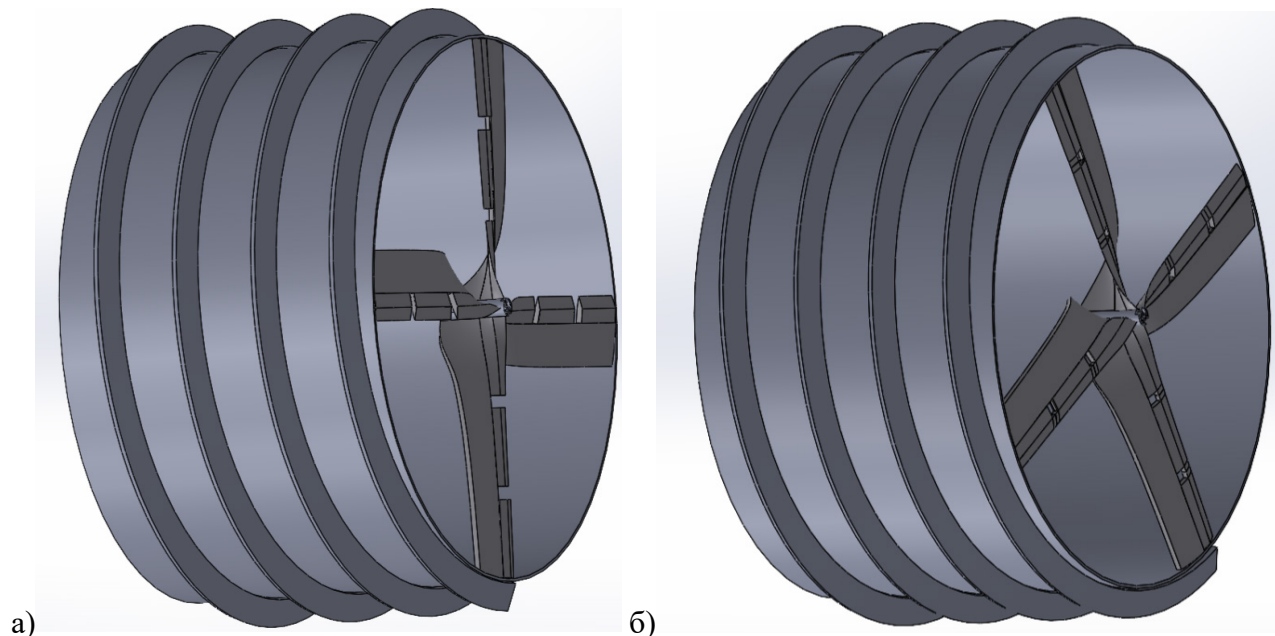


Рисунок 2.8 – Схемные решения по компоновке отвала и ножа ИО геохода
(а – прерывистая режущая кромка; б – сплошная режущая кромка)

В разработанной компоновке (рисунок 2.8, а) режущая кромка выполнена прерывистой, а на рисунке 2.8, б показана сплошная режущая кромка, то есть между сегментами (ножами) отсутствует определенное расстояние. Для данной схемы (рисунок 2.8, б) далее рассматриваются конструктивные особенности отвала и ножей.

Отвал ИО геохода разработан также геликоидной формы. Каждая точка в сечении отвала имеет такую же траекторию по длине ножа, как в сечении ножа. Отвал длиной 900 мм сделан с тремя выступами для установки ножей (рисунок 2.9). Для закрепления ножей к отвалу выполнено по два отверстия на поперечном сечении отвала от конца каждого выступа. Ближе к центру геохода (ось вращения), где сечение отвала повернуто на 90° , отверстия выполнены продольно, перпендикулярно к сечению ножа.

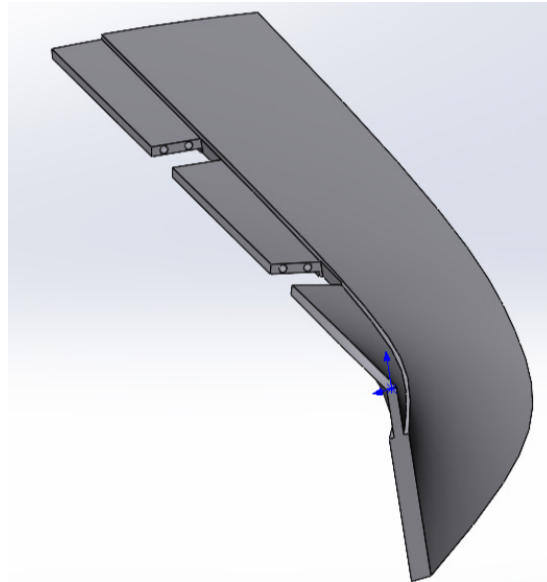


Рисунок 2.9 – Схемное решение по конструктивному исполнению отвала ИО
геохода

Режущая кромка НИО в данном случае разделяется на 3 сектора (элемента), и режущая часть выполняется в виде 3 (или более) отдельных ножей (рисунки 2.10-2.12).

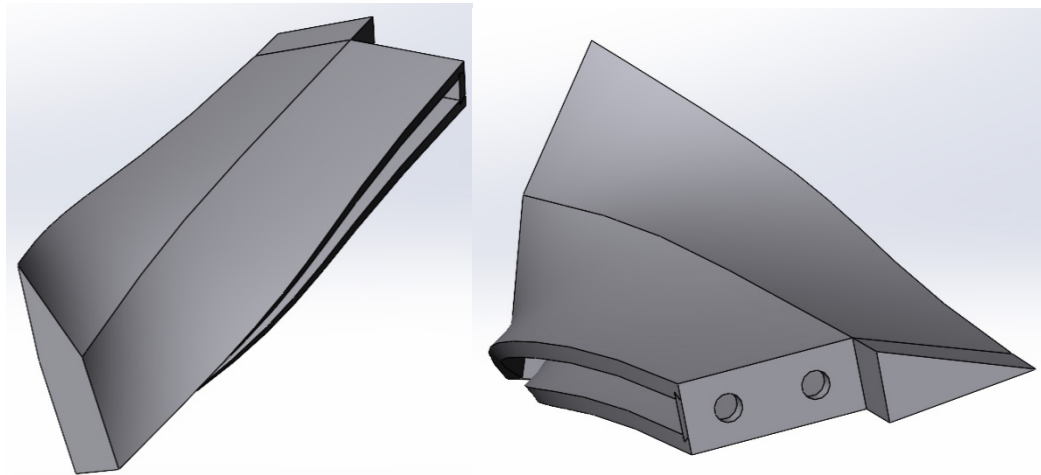


Рисунок 2.10 – Схемное решение по конструктивному исполнению первого ножа
(центральная часть ИО)

Схемное решение по конструктивному выполнению ножа представлено на рисунке 2.10. Нож выполнен с учетом паза по криволинейной поверхности. Также выполнены отверстия под крепежом. Ближе к центру вращения геохода отверстие под крепежом находится перпендикулярно к сечению ножа.

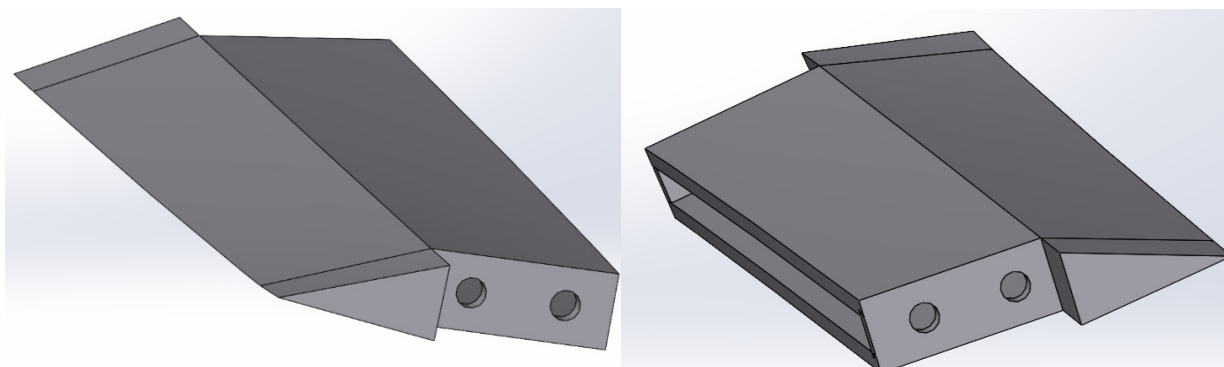


Рисунок 2.11 – Схемное решение по конструктивному исполнению ножа
(средняя часть ИО)

Схемное решение по конструктивному исполнению средней части режущей кромки представлено на рисунке 2.11. Данный нож выполнен геликоидным. Сделаны два отверстия для фиксации и закрепления ножа к отвалу. С двух сторон предлагается выполнить вырез для того, чтобы обеспечить сплошную режущую кромку.

На рисунке 2.12 приведено схемное решение конструктивного исполнения ножа на периферии. Данный нож устанавливается ближе к корпусу геохода.

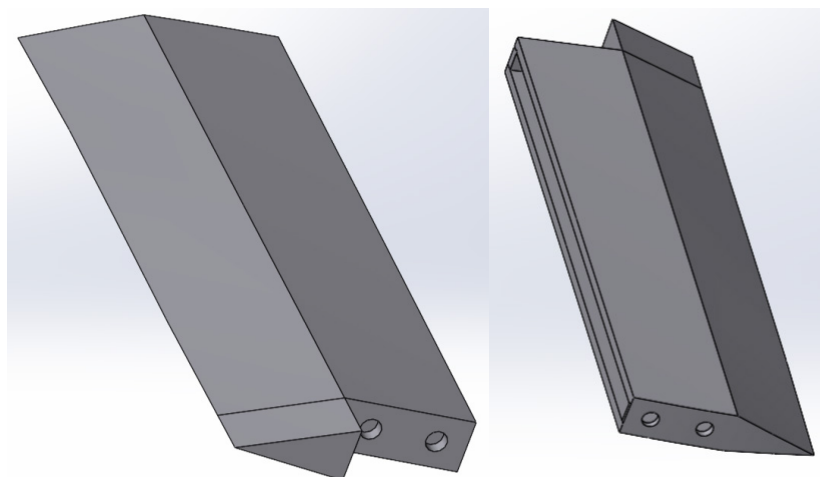


Рисунок 2.12 – Схемное решение по конструктивному исполнению третьего ножа
(на периферии)

На рисунке 2.13 показано размещение всех основных элементов узла: отвал, нож, элементы крепления. Конструкция позволяет обеспечить правильную фиксацию ножей с помощью винтов, что обеспечивает быструю замену ножей в стесненных условиях. Ножи легко заменяются, что способствует быстрому приспособлению устройств к разным горно-геологическим условиям. Это

способствует улучшению производительности и снижению затрат на обслуживание геохода.

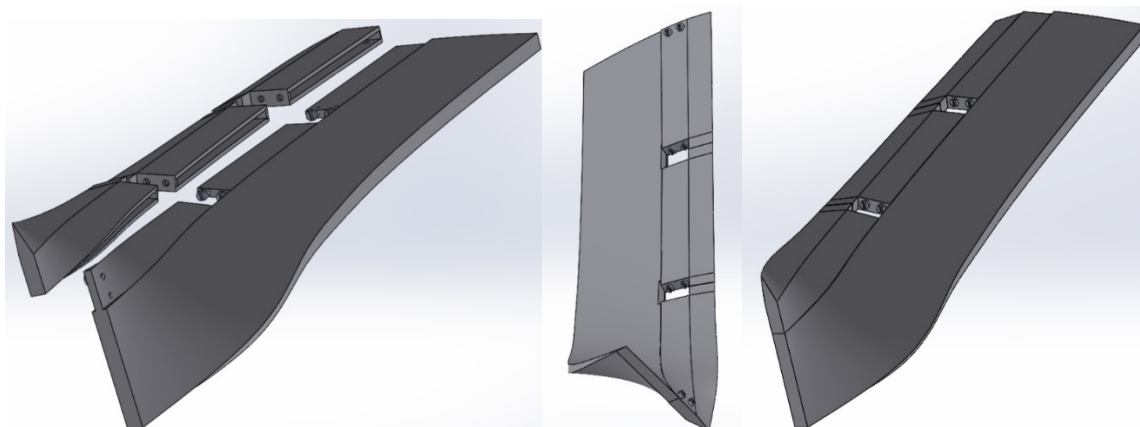


Рисунок 2.13 – Схемные решения по сборке узла НИО геохода

По полученным схемам была разработана цифровая модель НИО геохода со сплошной режущей кромкой (рисунок 2.14).

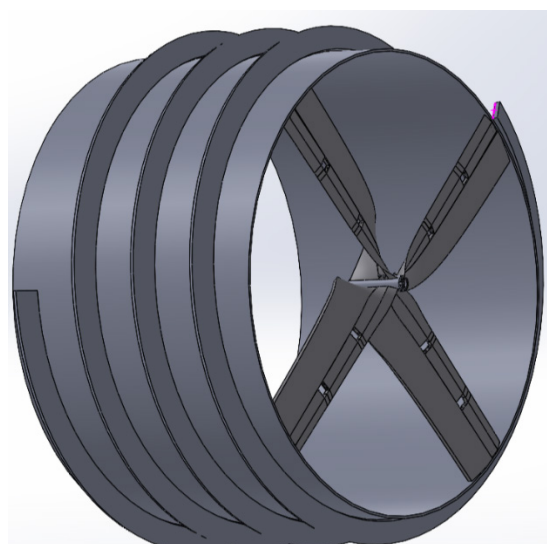


Рисунок 2.14 – Цифровая модель НИО геохода со сплошной режущей кромкой

В цифровой модели представлены различные варианты расположения ножа относительно отвала, что позволяет улучшить процесс работы устройства. Конструкция может включать в себя несколько углов постановки ножа, что обеспечивает максимальную эффективность при разных типах почвы и условиях работы. Комбинация этих элементов влияет на устойчивость геохода и его производительность, позволяя адаптировать технику под конкретные задачи.

Использование раздельных ножей в конструкции НИО геохода предоставляет несколько преимуществ. Во-первых, разделение режущей кромки на отдельные части (ножи) позволяет более эффективно распределять нагрузку на

кромку, что способствует увеличению срока службы инструмента. Во-вторых, конструкция облегчает процесс замены поврежденных или изношенных ножей без необходимости замены всего ИО, что снижает затраты на обслуживание и ремонт. В-третьих, отдельные ножи обеспечивают более качественное резание за счет возможности индивидуальной настройки углов резания и давления на материал. Также применяются различные технологические решения по созданию ножей, исходя из возникающих нагрузок на каждый конкретный нож.

2.4 Совершенствование математической модели взаимодействия ножей геликоидной формы с затупленной режущей кромкой ИО геохода с породой забоя

Для учета износа режущих кромок разрабатываются модели, которые позволяют учитывать изменения геометрии ножей в процессе эксплуатации, что влияет на силу резания и эффективность проходки. Для установления силы резания ножей с затупленной режущей кромкой используется модель полувыпуклой геликоидной формы НИО геохода. Основные принципы этого подхода базируются на методике определения сил резания для ножей с затупленной кромкой, разработанной Ю.А. Ветровым [51–53], с применением эмпирических коэффициентов, отражающих особенности взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала. Такой подход позволяет точно оценить силы при затупленных ножах, что важно для повышения эффективности и долговечности инструментов при подземных работах.

Для определения силы резания ножей с затупленной режущей кромкой рассматривается схема действия сил полувыпуклой геликоидной формы НИО геохода [9]. В работах [9-10, 48] были определены геометрические параметры НИО геохода с различными формами режущей кромки. Для определения усилия резания НИО с учетом параметров площадки износа принимаются параметры конструктивных решений ИО геохода, приведенные в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Геометрические параметры НИО геохода

Параметры	Единицы измерения	Обозначение
Радиус геохода	мм	r_r
Радиус образующей	мм	r_0
Ширина резания	мм	b
Шаг внешнего движителя	м	h_b
Количество лучей	шт	n
Радиус кривизны режущей кромки ножа с центром, расположенным на оси выработки.	мм	$r_{кр}$

Износ ножей ИО геохода происходит в результате механического взаимодействия ножа с обрабатываемым материалом. Площадка износа – это область на лезвии ножа, где наблюдается наибольшее снижение его размеров и изменение геометрии, что может привести к снижению эффективности резания и увеличению силы резания. Факторы, влияющие на площадку износа, включают твердость и абразивность материала, условия работы (температура, влажность), а также конструктивные особенности самого НИО.

Опыт и результаты исследования по резанию сред и материалов позволяли предполагать [54-55], что изнашивания и затупления режущего инструмента в грунтах должны существенно увеличивать рабочие сопротивления проходческого агрегата. Так же ряд исследований показывают, что площадка износа вследствие изнашивания режущего инструмента вызывает существенное увеличение сопротивления грунта. Таким образом для перемещения геохода требуются тяговые усилия, которые значительно превышают усилия для отделения стружки тех же размеров, что и острым ножом.

Для анализа воздействия параметров затупления ножей на силовые характеристики НИО геохода осуществляется исследование силы сопротивления грунта, обусловленной процессом резания. Эти параметры, зависящие от ширины среза, проецируются на ось вращения и на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода, а также оценивается момент сопротивления, возникающий в результате таких сил у затупленных ножей.

Для определения зависимости силовых характеристик взаимодействия геохода с породой забоя от его конструкции необходимо выполнить расчет

параметров геологической среды при условии возведения подземных объектов с использованием геохода с НИО.

Данные о величинах удельной силы резания и коэффициентах условий работы затупленными ножами для мягких пород из работы Ветрового В.Ю [53]. В таблице 2.4 приведены горнотехнические условия проведения выработки геоходом с НИО.

Таблица 2.4 – Горнотехнические условия проведения выработки геоходом с НИО

Наименование	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Радиус геохода	r_z	м	1,6
Радиус образующей	r_o	м	0,1
Коэффициент, учитывающий влияние угла резания	φ		0,59
Удельная сила резания в лобовой части прорези при угле резания 45°	$m_{св}$	Н/м ²	31000
Сила разрушения грунта в боковых частях прорези	$m_{бок}$	Н/м ²	9000
Удельная сила среза одним из боковых ребер ножа	$m_{бок,ср}$	Н/м ²	740
Параметры, отражающие сопротивление грунтов упруго-пластическому сжатию	P_o	Н/м	11300
	$P_{усл}$	Н/м	61900
	$h_{усл}$	м	0,639
Угол резания	δ	град	25
Угол трения	$\varphi_{тр}$	град	31,4

Проекция составляющей силы сопротивления грунта резанию, которая зависит от ширины среза, на ось вращения геохода, с учетом параметров площадки износа, будет равна:

$$P_{o,св} = \int_{r_0}^{r_z} \sin\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right) \cos\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right) \phi m_{св} \frac{h_6}{n} + \left(p_o + p_{усл} \frac{\frac{h_6}{n} \cos\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right)}{\left(\frac{h_6}{n} \cos\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right) + h_{усл}\right)} \right) db -$$

$$- \int_{r_0}^{r_z} \cos\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right) \frac{\sqrt{r_{кр}^2 - b^2}}{r_{кр}} \operatorname{ctg}(\delta + \phi_{тр}) \cos\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right) \phi m_{св} \frac{h_6}{n} - \left(p_o + p_{усл} \frac{\frac{h_6}{n} \cos\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right)}{\left(\frac{h_6}{n} \cos\left(\arctg \frac{h_6}{2\pi b}\right) + h_{усл}\right)} \right) db \quad .(2.12)$$

Проекция составляющей силы сопротивления грунта резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода, которая зависит от ширины среза, с учетом параметров площадки износа, будет равна:

$$R_{u.o.cb} = \int_{r_0}^{r_s} \cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) \left(\cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) \phi m_{cb} \frac{h_g}{n} + \left(p_o + p_{ycl} \frac{\frac{h_g}{n} \cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right)}{\left(\frac{h_g}{n} \cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) + h_{ycl}\right)} \right) \right) db +$$

$$+ \int_{r_0}^{r_s} \sin\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) \frac{\sqrt{r_{kp}^2 - b^2}}{r_{kp}} \operatorname{ctg}(\delta + \phi_{TP}) \left(\cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) \phi m_{cb} \frac{h_g}{n} - \left(p_o + p_{ycl} \frac{\frac{h_g}{n} \cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right)}{\left(\frac{h_g}{n} \cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) + h_{ycl}\right)} \right) \right) db \quad (2.13)$$

С учетом параметров площадки износа момент сопротивления резанию от проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию, зависящей от ширины среза, на плоскость, перпендикулярную оси вращения геохода:

$$M_{u.o.cb} = \int_{r_0}^{r_s} b \cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) \left(\cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) \phi m_{cb} \frac{h_g}{n} + \left(p_o + p_{ycl} \frac{\frac{h_g}{n} \cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right)}{\left(\frac{h_g}{n} \cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) + h_{ycl}\right)} \right) \right) db +$$

$$+ \int_{r_0}^{r_s} b \sin\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) \frac{\sqrt{r_{kp}^2 - b^2}}{r_{kp}} \operatorname{ctg}(\delta + \phi_{TP}) \left(\cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) \phi m_{cb} \frac{h_g}{n} - \left(p_o + p_{ycl} \frac{\frac{h_g}{n} \cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right)}{\left(\frac{h_g}{n} \cos\left(\arctg \frac{h_g}{2\pi b}\right) + h_{ycl}\right)} \right) \right) db \quad (2.14)$$

В результате решения интегралов (2.12), (2.13) и (2.14) получены зависимость и проекции силовых параметров сопротивления грунта резанию от количества лучей. На рис. 2.15 приведена зависимость $P_{o.cb}$ – проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию от количества лучей n .

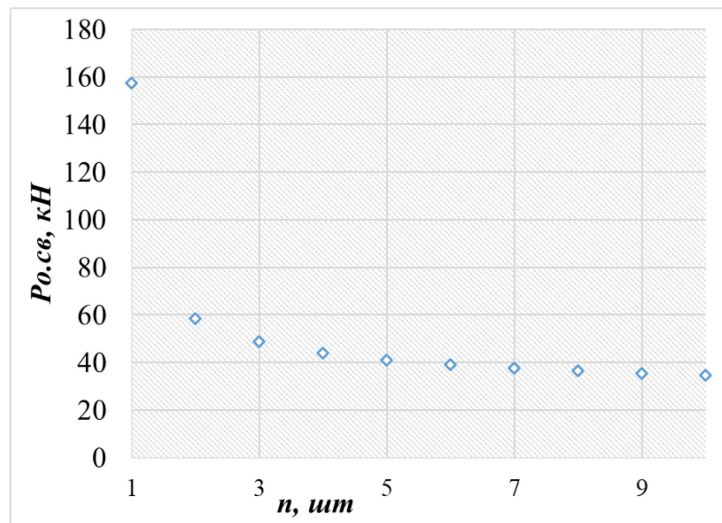


Рисунок 2.15 – Зависимость проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию ($P_{o.cb}$) от количества лучей (n)

На рис. 2.16 приведена зависимость $R_{o.cв}$ – проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию от количества лучей n .

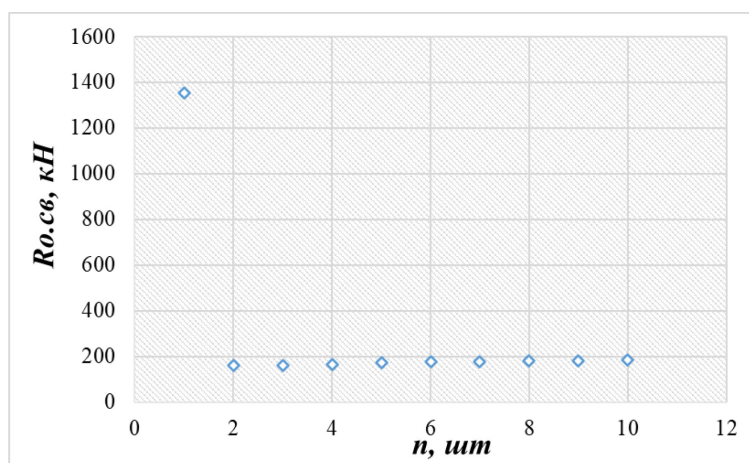


Рисунок 2.16 – Зависимость проекции составляющей силы

сопротивления грунта резанию ($R_{o.cв}$) от количества лучей (n)

На рис. 2.17 приведена зависимость $M_{u.o.cв}$ – момента сопротивления резанию от проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию от количества лучей n .

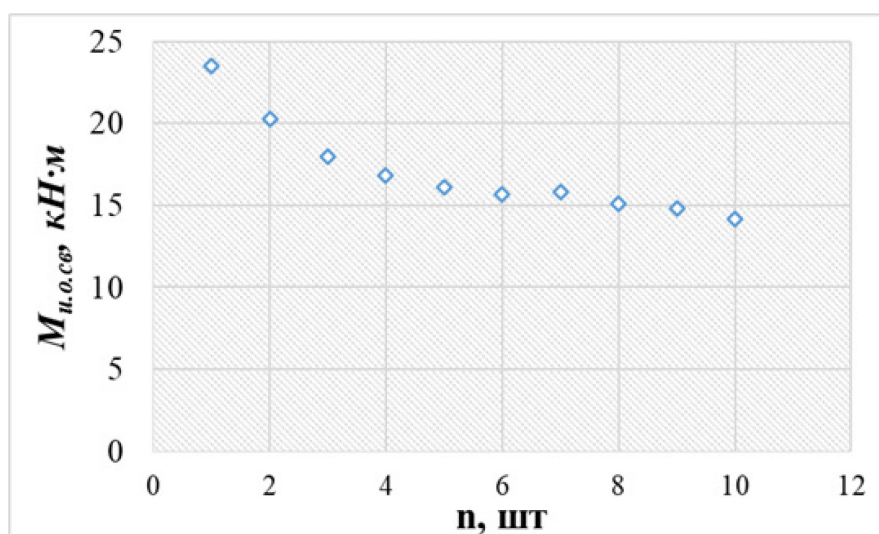


Рисунок 2.17 – Зависимость момента сопротивления резанию от проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию ($M_{u.o.cв}$) от количества лучей (n)

На основе полученных зависимостей следует сделать вывод, что параметры площадки износа оказывают значительное влияние на силовые характеристики геохода. Исследования, проведенные с использованием интегралов (2.12), (2.13) и (2.14), позволяют утверждать, что изменение количества лучей n напрямую

сказывается на проекциях силовых параметров сопротивления грунта резанию и момента сопротивления.

Для более точного прогнозирования и анализа износа инструмента в зависимости от различных факторов, таких как геометрия инструмента, скорость резания и свойства материала, используется уравнение кривой линейного износа по задней грани. Уравнение показывает зависимость между износом инструмента (Δ) и различными факторами, такими как геометрия инструмента, скорость резания и свойства материала.

Уравнение кривой линейного износа ножа ИО геохода (Δ) по задней грани с учетом поправочных коэффициентов имеет вид [54-55]:

$$\Delta = K_r K_g K_{m.c} \left(0,25\alpha^{0,5} + 0,28\alpha^{1,4} \left(L - \frac{0,14}{\alpha^{0,7}} \right) \right), \quad (2.15)$$

где K_r – поправочный коэффициент на геометрию инструмента, K_g – поправочный коэффициент на скорость резания, $K_{m.c}$ – поправочный коэффициент на свойства материала инструмента, α – абразивность пород, L – длина пути резания.

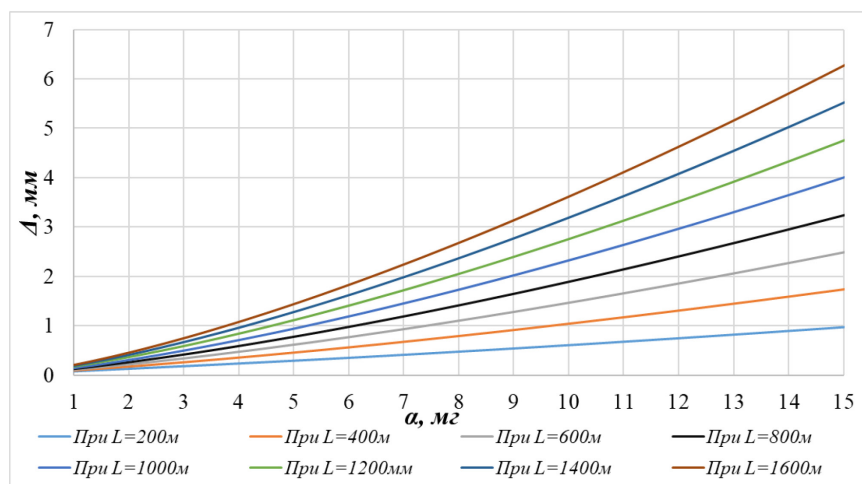


Рисунок 2.18 – Зависимость величины износа (Δ) от абразивности пород (α) при различных значениях длины пути ножа (L)

Полученный график зависимости $\Delta = f(L)$ на рисунке 2.18 позволяет оценить степень износа ножа ИО при разных значениях абразивности пород и длины пути. Согласно предоставленным данным, величина износа ножа (Δ) увеличивается с ростом абразивности пород (α). Данная зависимость носит практически линейный

характер, что указывает на значительное влияние абразивных свойств разрабатываемых пород на долговечность инструмента. Величина износа также напрямую связана с длиной пути резания (L). Чем больше пройденный путь, тем выше износ инструмента.

Учет критериев и эксплуатационных требований при создании НИО является важным аспектом. Конструкторско-технологические решения включают в себя выбор материалов, способы получения заготовки для основных элементов НИО геохода, технологии обработки, которые, в свою очередь, обуславливают функциональность и долговечность инструмента. Технологическая наследственность при производстве НИО может привести к тому, что изменения на одной стадии производства могут повлечь за собой последствия для геометрии инструмента и его поведения в процессе эксплуатации.

2.5 Анализ схемных решений НИО геохода на соответствие предъявляемым к ним эксплуатационным требованиям

Для анализа схемных решений на соответствие предъявляемым к ним эксплуатационным требованиям при создании основных элементов НИО геохода будет использован метод многокритериального анализа ELECTRE II, как было определено в п.1.4.

Для оценки наиболее подходящего варианта схемных решений рассматриваем основные виды таких схем:

- схемные решения по компоновке с учетом формы ножей ИО;
- схемные решения по центральной части;
- схемные решения по компоновке НИО с учетом способов закрепления, сборки и соединения с центральной частью.

Для каждой группы этих решений будем рассматривать их сравнения по определенным критериям, включая эксплуатационные при создании НИО геохода.

Исходными данными для выбора схемных решений по компоновке с учетом формы ножей ИО является матрица оценки критериев по десятибалльной шкале,

которая проранжирована (в виде коэффициентов веса) и представлена в таблице 2.5. Варианты представляют собой схемные решения ИО геолода, а критериями выступают требования к ним.

Таблица 2.5 – Оценки критериев по десятибалльной шкале для схемных решений по компоновке, с учетом формы ножей

Критерии	Оценки критериев			
	Вариант A1	Вариант B1	Вариант C1	Вариант D1
K11	8	6	5	9
K12	3	5	5	4
K13	5	3	4	3
K14	8	4	5	4
K15	8	3	4	4
K16	2	6	3	5
K17	7	3	4	3
K18	8	2	4	3
K19	9	1	4	3

Для упрощения выполнения расчетов вводятся следующие обозначения для вариантов в скобках:

- прямая геликоидная (вариант A1);
- выпуклая геликоидная (вариант B1);
- геликоидная с воронкой (вариант D1);
- полувыпуклая геликоидная (вариант C1).

Обозначения критериев для выбора схемных решений указаны в скобках:

- геометрическая форма ножей (K11);
- износостойкость материала ножей, способность сохранять рабочие характеристики в условиях эксплуатации (K12);
- доступность для обслуживания, легкость замены и ремонта ножей (K13);
- компактность и габариты – влияние на общую компоновку проходческого агрегата (K14);
- совместимость с другими системами и узлами оборудования – возможность интеграции с существующими системами (K15);
- устойчивость к нагрузкам – способность выдерживать высокие механические нагрузки (K16);
- технологичность, простота материалообработки и наладки (K17);
- трудоемкость при создании основных элементов (K18);

– металлоемкость (K19).

Для определения преимущества каждого варианта относительно других вариантов строятся матрицы превосходства по критериям. Если оценка рассматриваемого варианта больше оценки сравниваемого, ставится «+», если меньше – «-», если равны, то «=». Этот подход позволяет наглядно выделить преимущества и недостатки различных вариантов. В таблице 2.6 приведена матрица превосходства Варианта A1 относительно других вариантов.

Таблица 2.6 – Матрица превосходства Варианта A1 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта B1	Относительно Варианта C1	Относительно Варианта D1
K11	+	+	+
K12	-	-	+
K13	+	+	-
K14	+	+	-
K15	+	+	-
K16	-	-	+
K17	+	+	-
K18	+	+	-
K19	+	+	-

В таблице 2.7 приведена матрица превосходства Варианта B1 относительно других вариантов.

Таблица 2.7 – Матрица превосходства Варианта B1 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта A1	Относительно Варианта C1	Относительно Варианта D1
K11	-	+	-
K12	+	=	+
K13	-	-	=
K14	-	-	=
K15	-	-	-
K16	+	+	+
K17	-	-	=
K18	-	-	-
K19	-	-	-

В таблице 2.8 приведена матрица превосходства Варианта C1 относительно других вариантов.

Таблица 2.8 – Матрица превосходства Варианта C1 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта A1	Относительно Варианта B1	Относительно Варианта D1
K11	-	-	-
K12	+	=	+
K13	-	+	+
K14	-	+	+
K15	-	+	=
K16	+	-	-
K17	-	+	+
K18	-	+	+
K19	-	+	+

В таблице 2.9 приведена матрица превосходства Варианта D1 относительно других вариантов.

Таблица 2.9 – Матрица превосходства Варианта D1 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта A1	Относительно Варианта B1	Относительно Варианта C1
K11	-	+	+
K12	+	-	-
K13	-	=	-
K14	-	=	-
K15	-	+	=
K16	+	-	+
K17	-	=	-
K18	-	+	-
K19	-	+	-

Каждому критерию присваиваются весовые коэффициенты в зависимости от его значимости. Это позволяет учесть, что некоторые аспекты могут иметь приоритет перед другими при принятии решения. В таблице 2.10 приведены значения весовых коэффициентов для каждого критерия.

Таблица 2.10 – Весовые коэффициенты критериев

Название критериев	Критерии	Весовые коэффициенты
геометрическая форма ножей	K11	0,166
износостойкость материала ножей, способность сохранять рабочие характеристики в условиях эксплуатации	K12	0,118
доступность для обслуживания, легкость замены и ремонта ножей	K13	0,089
компактность и габариты – влияние на общую компоновку проходческого агрегата	K14	0,124
совместимость с другими системами и узлами оборудования – возможность интеграции с существующими системами	K15	0,107
устойчивость к нагрузкам – способность выдерживать высокие механические нагрузки	K16	0,095
технологичность, простота материалаобработки и наладки	K17	0,101
трудоемкость изготовления	K18	0,101
металлоемкость	K19	0,101

Для нахождения матриц несогласия в методе ELECTRE II рассчитываются суммы весовых коэффициентов критериев для множеств более предпочтительных (I_{jk}^+), равноценных (I_{jk}^-) и менее предпочтительных (I_{jk}) значений. Это позволяет определить степень согласия или несогласия между вариантами, что важно для дальнейшего анализа и принятия решений. Суммы весовых коэффициентов множества I_{jk}^+ приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Суммы весовых коэффициентов критериев для множества I_{jk}^+

	Вариант A1	Вариант B1	Вариант C1	Вариант D1
Вариант A1	-	0,787	0,787	0,379
Вариант B1	0,213	-	0,260	0,213
Вариант C1	0,213	0,621	-	0,633
Вариант D1	0,213	0,473	0,260	-

Суммы весовых коэффициентов I_{jk} приведены в таблице 2.33.

Таблица 2.12 – Суммы весовых коэффициентов критериев для множества I_{jk}

	Вариант A1	Вариант B1	Вариант C1	Вариант D1
Вариант A1	-	0,213	0,213	0,621
Вариант B1	0,787	-	0,621	0,473
Вариант C1	0,787	0,260	-	0,260
Вариант D1	0,787	0,213	0,633	-

Суммы весовых коэффициентов множества I_{jk} приведены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Суммы весовых коэффициентов критериев для множества I_{jk}^-

	Вариант A1	Вариант B1	Вариант C1	Вариант D1
Вариант A1	-	0,000	0,000	0,000
Вариант B1	0	-	0,118	0,314
Вариант C1	0	0,118	-	0,107
Вариант D1	0	0,314	0,107	-

Матрица индексов согласия в методе ELECTRE II служит для оценки степени согласия между парами альтернатив на основе заданных критериев и рассчитывается по формуле (1.2), которая приведена в таблице 2.35.

Таблица 2.14 – Матрица индексов согласия (ELECTRE II)

	Вариант A1	Вариант B1	Вариант C1	Вариант D1
Вариант A1	-	3,694444	3,694444	0,609524
Вариант B1	0,270677	-	0,419048	0,45
Вариант C1	0,270677	2,386364	-	2,431818
Вариант D1	0,270677	2,222222	0,411215	-

Матрица индексов несогласия построена на основе оценок показателей каждой альтернативы по заданным критериям по формуле (1.3) и приведена в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Матрица индексов несогласия (ELECTRE II)

	Вариант A1	Вариант B1	Вариант C1	Вариант D1
Вариант A1	-	0,2	0	0,1
Вариант B1	0,8	-	0,3	0,3
Вариант C1	0,5	0,3	-	0,4
Вариант D1	0,6	0,3	0,1	-

Для оценки наилучшего варианта схемных решений по компоновке ИО применяются значения p и q , равные 0,5 в обоих случаях [31-35]. В результате сравнения значений ячеек с величинами p и q создана матрица решений. В частности, матрица решений, примененная в методе ELECTRE II, представлена в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Матрица решений (ELECTRE II)

	Вариант A1	Вариант B1	Вариант C1	Вариант D1
Вариант A1	-	+	+	+
Вариант B1	-	-	-	-
Вариант C1	-	-	-	+
Вариант D1	-	+	-	-

Таким образом, изучая матрицы решений, следует отметить, что вариант решения A1 (прямая геликоидная форма) относительно других альтернативных вариантов имеет большее превосходство и является наилучшим вариантом, учитывая те критерии, которые были заданы в начале при заданных условиях многокритериального анализа. Исходя из матрицы решений, определяется результат доминирования альтернатив для схемных решений по компоновке, с учетом формы ножей ИО: A1-C1-D1-B1.

Для анализа схемных решений по центральному ножу ИО в качестве исходных данных выбрана матрица оценки критериев по десятибалльной шкале (таблица 2.17).

Таблица 2.17 – Оценки критериев по десятибалльной шкале для схемных решений по центральному ножу

Критерии	Оценки критериев					
	Вариант A2	Вариант B2	Вариант C2	Вариант D2	Вариант E2	Вариант F2
K21	4	7	5	2	4	1
K22	5	4	6	3	3	7
K23	5	7	5	8	1	5
K24	3	8	6	7	6	8
K25	6	8	4	8	3	5
K26	4	5	6	3	5	7

Для упрощения выполнения анализа вводим следующие обозначения для вариантов в скобках:

- центральный нож виде цилиндрической формы с конечной частью, выполненной в конусообразной форме (рисунок 2.6, а) (вариант A2);
- центральный нож в виде кольца (рисунок 2.6, б) (вариант B2);
- центральный нож в виде инструмента, который состоит из двух пересекающихся между собой прямоугольных элементов с лезвиями (рисунок 2.6, в) (вариант C2);
- центральный нож из сплошного цилиндрического элемента (рисунок 2.6, г) (вариант D2);

– центральный нож в виде элементов, которые состоят из прямоугольных ножей (рисунок 2.6, д) (вариант E2);

– центральный нож в виде режущего инструмента цилиндрической формы (рисунок 2.6, д) (вариант F2).

Обозначения критериев для выбора схемных решений по центральному ножу указаны в скобках:

– металлоемкость – количество используемого металла, влияет на стоимость и вес составляет (K21);

– прочность конструкции – способность ножа выдерживать нагрузки и сопротивляться повреждениям (K22);

– технологичность производства – легкость и экономия в процессе создания ножа (K23);

– компактность конструкции – размеры и масса, влияющие на его маневренность (K24);

– упрощение обслуживания – легкость доступа к узлам и механизмам для ремонта и обслуживания (K25);

– энергоэффективность – уровень энергозатрат при работе агрегата с данным решением (K26).

Далее разрабатываются матрицы превосходства для каждого варианта. В таблице 2.18 приведена матрица превосходства Варианта A2 относительно других вариантов.

Таблица 2.18 – Матрица превосходства Варианта A2 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта B2	Относительно Варианта C2	Относительно Варианта D2	Относительно Варианта E2	Относительно Варианта F2
K21	-	-	+	=	+
K22	+	-	+	-	-
K23	-	=	-	+	=
K24	-	-	-	-	-
K25	-	+	+	+	+
K26	-	-	+	+	-

В таблице 2.19 приведена матрица превосходства Варианта B2 относительно других вариантов.

Таблица 2.19 – Матрица превосходства Варианта В2 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта А2	Относительно Варианта С2	Относительно Варианта D2	Относительно Варианта E2	Относительно Варианта F2
K21	+	+	+	+	+
K22	-	-	+	+	-
K23	+	+	-	+	+
K24	+	+	+	+	=
K25	+	+	=	+	+
K26	+	-	+	=	-

В таблице 2.20 приведена матрица превосходства Варианта С2 относительно других вариантов.

Таблица 2.20 – Матрица превосходства Варианта С2 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта А2	Относительно Варианта В 2	Относительно Варианта D2	Относительно Варианта E2	Относительно Варианта F2
K21	-	-	+	+	+
K22	+	+	+	+	-
K23	=	-	-	+	=
K24	+	-	-	=	-
K25	-	-	-	+	-
K26	+	+	+	+	-

В таблице 2.21 приведена матрица превосходства Варианта D2 относительно других вариантов.

Таблица 2.21 – Матрица превосходства Варианта D2 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта А2	Относительно Варианта В2	Относительно Варианта С2	Относительно Варианта E2	Относительно Варианта F2
K21	-	-	-	-	+
K22	-	-	-	=	-
K23	+	+	+	+	+
K24	+	-	+	+	-
K25	+	=	+	+	+
K26	-	-	-	-	-

В таблице 2.22 приведена матрица превосходства Варианта E2 относительно других вариантов.

Таблица 2.22 – Матрица превосходства Варианта E2 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта A2	Относительно Варианта B 2	Относительно Варианта C2	Относительно Варианта D2	Относительно Варианта F2
K21	=	-	-	+	+
K22	-	-	-	=	-
K23	-	-	-	-	-
K24	+	-	=	-	-
K25	-	-	-	-	-
K26	+	=	-	+	-

В таблице 2.23 приведена матрица превосходства Варианта F2 относительно других вариантов.

Таблица 2.23 – Матрица превосходства Варианта F2 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта A2	Относительно Варианта B 2	Относительно Варианта C2	Относительно Варианта D2	Относительно Варианта E2
K21	-	-	-	-	-
K22	+	+	+	+	+
K23	=	-	=	-	+
K24	+	=	+	+	+
K25	-	-	+	-	+
K26	+	+	+	+	+

Каждому критерию присвоен весовой коэффициент в зависимости от значимости критерия. Весовые коэффициенты критериев приведены в таблице 2.24.

Таблица 2.24 – Весовые коэффициенты критериев

Название критерия	Критерии	Весовые коэффициенты
металлоемкость	K21	0,125
прочность конструкции – способность ножа выдерживать нагрузки и сопротивляться повреждениям	K22	0,152
технологичность производства – легкость и экономия в процессе изготовления ножа	K23	0,168
компактность конструкции – размеры и масса, влияющие на его маневренность	K24	0,207
упрощение обслуживания – легкость доступа к узлам и механизмам для ремонта и обслуживания	K25	0,185
энергоэффективность – уровень энергозатрат при работе агрегата с данным решением	K26	0,163

Для определения матриц несогласия в рамках метода ELECTRE II осуществляется суммирование весовых коэффициентов для групп критериев, которые демонстрируют более предпочтительные, равноценные или менее

предпочтительные оценки. В таблице 2.25 представлены итоговые суммы этих весовых коэффициентов для множества I_{jk}^+ .

Таблица 2.25 – Суммы весовых коэффициентов критериев для множества I_{jk}^+

	Вариант A2	Вариант B2	Вариант C2	Вариант D2	Вариант E2	Вариант F2
Вариант A2	-	0,152	0,185	0,625	0,516	0,310
Вариант B2	0,848	-	0,685	0,484	0,837	0,478
Вариант C2	0,522	0,315	-	0,440	0,793	0,125
Вариант D2	0,560	0,168	0,560	-	0,560	0,478
Вариант E2	0,370	0	0	0,288	-	0,125
Вариант F2	0,315	0,315	0,707	0,522	0,875	-

В таблице 2.26 приведены суммы весовых коэффициентов критериев для множества I_{jk} .

Таблица 2.26 – Суммы весовых коэффициентов критериев для множества I_{jk}

	Вариант A2	Вариант B2	Вариант C2	Вариант D2	Вариант E2	Вариант F2
Вариант A2	-	0,848	0,647	0,375	0,359	0,522
Вариант B2	0,152	-	0,315	0,168	0	0,315
Вариант C2	0,337	0,685	-	0,560	0	0,707
Вариант D2	0,440	0,647	0,440	-	0,288	0,522
Вариант E2	0,505	0,837	0,793	0,560	-	0,875
Вариант F2	0,310	0,478	0,125	0,478	0,125	-

В таблице 2.27 приведены суммы весовых коэффициентов критериев для множества I_{jk}^- .

Таблица 2.27 – Суммы весовых коэффициентов критериев для множества I_{jk}^-

	Вариант A2	Вариант B2	Вариант C2	Вариант D2	Вариант E2	Вариант F2
Вариант A2	-	0,000	0,168	0,000	0,125	0,168
Вариант B2	0,000	-	0,000	0,185	0,163	0,207
Вариант C2	0,168	0,000	-	0,000	0,207	0,168
Вариант D2	0,000	0,185	0,000	-	0,152	0
Вариант E2	0,125	0,163	0,207	0,152	-	0
Вариант F2	0,168	0,207	0,168	0	0	-

По формуле (1.2) рассчитываются индексы согласия для вариантов решений по центральному ножу, которые приведены в таблице 2.28.

Таблица 2.28 – Матрица индексов согласия (ELECTRE II)

	Вариант A2	Вариант B2	Вариант C2	Вариант D2	Вариант E2	Вариант F2
Вариант A2	-	0,179487	0,285714	1,666667	1,439394	0,59375
Вариант B2	5,571429	-	2,172414	2,870968	∞	1,517241
Вариант C2	1,548387	0,460317	-	0,786408	∞	0,176923
Вариант D2	1,271605	0,260504	1,271605	-	1,943396	0,916667
Вариант E2	0,731183	0	0	0,514563	-	0,142857
Вариант F2	1,017544	0,659091	5,652174	1,090909	7	-

По формуле (1.3) рассчитываются индексы несогласия для вариантов решений по центральному ножу, которые приведены в таблице 2.29.

Таблица 2.29 – Матрица индексов несогласия (ELECTRE II)

	Вариант A2	Вариант B2	Вариант C2	Вариант D2	Вариант E2	Вариант F2
Вариант A2	-	0,5	0,3	0,4	0,3	0,5
Вариант B2	0,1	-	0,2	0,1	0	0,3
Вариант C2	0,2	0,4	-	0,4	0	0,2
Вариант D2	0,2	0,5	0,3	-	0,2	0,4
Вариант E2	0,4	0,6	0,4	0,7	-	0,4
Вариант F2	0,3	0,6	0,4	0,3	0,3	-

Для оценки наилучшего варианта схемных решений по центральному ножу ИО применяются значения p и q , равные 0,5 и 0,4 соответственно. В результате сравнения значений ячеек с величинами p и q создана матрица решений, которая приведена в таблице 2.30.

Таблица 2.30 – Матрица решений (ELECTRE II)

	Вариант A2	Вариант B2	Вариант C2	Вариант D2	Вариант E2	Вариант F2
Вариант A2	-	-	-	+	+	-
Вариант B2	+	-	+	+	+	+
Вариант C2	+	-	-	+	+	-
Вариант D2	+	-	+	-	+	+
Вариант E2	+	-	-	-	-	-
Вариант F2	+	+	+	+	+	-

Полученная матрица решений для разных вариантов центрального ножа показывает, что варианты B2 и F2 имеют одинаковые степени превосходства по отношению с другими вариантами. В качестве дополнительной оценки используются такие параметры, как $\sum I_{jk}^+$ и $\sum I_{jk}^-$. Для сравнения берется соотношение данных показателей, которое показывает степень превосходства того или иного варианта по сравнению с другими. Таким образом, результатом ELECTRE-II доминирования альтернатив для схемных решения по центральному ножу является следующее: B2-F2-D2-C2-A2-E2.

Для анализа схемных решений по компоновке НИО с учетом способов закрепления, сборки и соединения с центральным ножом в качестве исходных данных выбрана матрица оценки критериев по десятибалльной шкале (таблица 2.31).

Таблица 2.31 – Оценки критериев по десятибалльной шкале для схемных решений по компоновке НИО геохода

Критерии	Оценки критериев					
	Вариант А3	Вариант В3	Вариант С3	Вариант D3	Вариант Е3	Вариант F3
K31	7	6	7	8	5	4
K32	6	5	5	3	7	3
K33	4	4	5	3	8	8
K34	7	6	7	5	5	6
K35	3	3	4	5	7	7
K36	4	3	5	6	4	3
K37	4	3	5	6	7	2

Для упрощения выполнения анализа вводим следующие обозначения для вариантов в скобках:

- компоновочная схема рисунок 2.7 а (вариант А3);
- компоновочная схема рисунок 2.7 б (вариант В3);
- компоновочная схема рисунок 2.7 в (вариант С3);
- компоновочная схема рисунок 2.7 г (вариант D3);
- компоновочная схема рисунок 2.7 д (вариант Е3);
- компоновочная схема рисунок 2.7 е (вариант F3).

Обозначения критериев для выбора схемных решений по компоновке НИО с учетом способов закрепления, сборки и соединения с центральным ножом указаны в скобках:

- сложность сборки и разборки – насколько легко осуществляется монтаж и демонтаж ИО (K31);
- прочность и устойчивость соединений между ножевым органом и центральным ножом (K32);
- масса конструкции – влияние на общую массу агрегата и его маневренность (K33);
- габаритные размеры – влияние на проходимость и возможности работы в ограниченных пространствах (K34);
- трудоемкость создания основных элементов (K35);
- стоимость производства и эксплуатации – экономические аспекты создания и использования ИО (K36);

– модульность – возможность замены и модернизации отдельных компонентов без необходимости полной разборки агрегата (K37).

Далее разрабатываются матрицы превосходства для каждого варианта. В таблице 2.32 приведена матрица превосходства Варианта А3 относительно других вариантов.

Таблица 2.32 – Матрица превосходства Варианта А3 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта В3	Относительно Варианта С3	Относительно Варианта D3	Относительно Варианта Е3	Относительно Варианта F3
K31	+	=	-	+	+
K32	+	+	+	-	+
K33	=	-	+	-	-
K34	+	=	+	+	+
K35	=	-	-	-	-
K36	+	-	-	=	+
K37	+	-	-	-	+

В таблице 2.33 приведена матрица превосходства Варианта В3 относительно других вариантов.

Таблица 2.33 – Матрица превосходства Варианта В3 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта А3	Относительно Варианта С3	Относительно Варианта D3	Относительно Варианта Е3	Относительно Варианта F3
K31	-	-	-	+	+
K32	-	=	+	-	+
K33	=	-	+	-	-
K34	-	-	+	+	=
K35	=	-	-	-	-
K36	-	-	-	-	=
K37	-	-	-	-	+

В таблице 2.34 приведена матрица превосходства Варианта С3 относительно других вариантов.

Таблица 2.34 – Матрица превосходства Варианта С3 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта А3	Относительно Варианта В3	Относительно Варианта D3	Относительно Варианта Е3	Относительно Варианта F3
K31	=	+	-	+	+
K32	-	=	+	-	+
K33	+	+	+	-	-
K34	=	+	+	+	+
K35	+	+	-	-	-
K36	+	+	-	+	+
K37	+	+	-	-	+

В таблице 2.35 приведена матрица превосходства Варианта D3 относительно других вариантов.

Таблица 2.35 – Матрица превосходства Варианта D3 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта A3	Относительно Варианта B3	Относительно Варианта C3	Относительно Варианта E3	Относительно Варианта F3
K31	+	+	+	+	+
K32	-	-	-	-	=
K33	-	-	-	-	-
K34	-	-	-	=	-
K35	+	+	+	-	-
K36	+	+	+	+	+
K37	+	+	+	-	+

В таблице 2.36 приведена матрица превосходства Варианта E3 относительно других вариантов.

Таблица 2.36 – Матрица превосходства Варианта E3 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта A3	Относительно Варианта B3	Относительно Варианта C3	Относительно Варианта D3	Относительно Варианта F3
K31	-	-	-	-	+
K32	+	+	+	+	+
K33	+	+	+	+	=
K34	-	-	-	=	-
K35	+	+	+	+	=
K36	=	+	-	-	+
K37	+	+	+	+	+

В таблице 2.37 приведена матрица превосходства Варианта F3 относительно других вариантов.

Таблица 2.37 – Матрица превосходства Варианта F3 относительно других вариантов

Критерии	Относительно Варианта A3	Относительно Варианта B3	Относительно Варианта C3	Относительно Варианта D3	Относительно Варианта E3
K31	-	-	-	-	-
K32	-	-	-	=	-
K33	+	+	+	+	=
K34	-	=	-	+	+
K35	+	+	+	+	=
K36	-	=	-	-	-
K37	-	-	-	-	-

Каждому критерию присвоены весовые коэффициенты в зависимости от значимости критерия. Весовые коэффициенты критериев приведены в таблице 2.38.

Таблица 2.38 – Весовые коэффициенты критериев

Название критериев	Критерии	Весовые коэффициенты
сложность сборки и разборки – насколько легко осуществляется монтаж и демонтаж ИО	K31	0,172
прочность и устойчивость соединений между ножевым органом и центральным ножом	K32	0,135
масса конструкции – влияние на общую массу агрегата и его маневренность	K33	0,149
габаритные размеры – влияние на проходимость и возможности работы в ограниченных пространствах	K34	0,167
трудоемкость создания основных элементов	K35	0,135
стоимость производства и эксплуатации – экономические аспекты создания и использования НИО	K36	0,116
модульность – возможность замены и модернизации отдельных компонентов без необходимости полной разборки агрегата	K37	0,126

Определяются суммы весовых коэффициентов критериев для групп значений, считающихся более предпочтительными, равноценными и менее предпочтительными. В таблице 2.39 представлены итоговые суммы весовых коэффициентов для множества I_{jk}^+ .

Таблица 2.39 – Суммы весовых коэффициентов критериев для множества I_{jk}^+

	Вариант А3	Вариант В3	Вариант С3	Вариант D3	Вариант Е3	Вариант F3
Вариант А3	-	0,716	0,135	0,451	0,340	0,716
Вариант В3	0,000	-	0,000	0,451	0,340	0,433
Вариант С3	0,526	0,865	-	0,451	0,456	0,716
Вариант D3	0,549	0,549	0,549	-	0,288	0,414
Вариант Е3	0,544	0,660	0,544	0,544	-	0,549
Вариант F3	0,284	0,284	0,284	0,451	0,167	-

В таблице 2.40 приведены суммы весовых коэффициентов критериев для множества I_{jk} .

Таблица 2.40 – Суммы весовых коэффициентов критериев для множества I_{jk}

	Вариант А3	Вариант В3	Вариант С3	Вариант D3	Вариант Е3	Вариант F3
Вариант А3	-	0,000	0,526	0,549	0,544	0,284
Вариант В3	0,716	-	0,865	0,549	0,660	0,284
Вариант С3	0,135	0,000	-	0,549	0,544	0,284
Вариант D3	0,451	0,451	0,451	-	0,544	0,451
Вариант Е3	0,340	0,340	0,456	0,288	-	0,167
Вариант F3	0,716	0,433	0,716	0,414	0,549	-

В таблице 2.41 приведены суммы весовых коэффициентов критериев для множества I_{jk}^- .

Таблица 2.41 – Суммы весовых коэффициентов критерий для множества I_{jk}^-

	Вариант А3	Вариант В3	Вариант С3	Вариант D3	Вариант Е3	Вариант F3
Вариант А3	-	0,284	0,340	0,000	0,116	0,000
Вариант В3	0,284	-	0,135	0,000	0,000	0,284
Вариант С3	0,340	0,135	-	0,000	0,000	0,000
Вариант D3	0,000	0,000	0,000	-	0,167	0,135
Вариант Е3	0,116	0,000	0,000	0,167	-	0,284
Вариант F3	0,000	0,284	0,000	0,135	0,284	-

По формуле (1.2) рассчитываются индексы согласия для вариантов решений по компоновке НИО с учетом способов закрепления и сборки, которые приведены в таблице 2.42.

Таблица 2.42 – Матрица индексов согласия (ELECTRE II)

	Вариант А3	Вариант В3	Вариант С3	Вариант D3	Вариант Е3	Вариант F3
Вариант А3	-	∞	0,257	0,822	0,624	2,525
Вариант В3	0,000	-	0,000	0,822	0,514	1,525
Вариант С3	3,897	∞	-	0,822	0,838	2,525
Вариант D3	1,216	1,216	1,216	-	0,530	0,918
Вариант Е3	1,603	1,945	1,194	1,887	-	3,278
Вариант F3	0,396	0,656	0,396	1,090	0,305	-

По формуле (1.3) рассчитываются индексы несогласия для вариантов решений по компоновке НИО с учетом способов закрепления и сборки, которые приведены в таблице 2.43.

Таблица 2.43 – Матрица индексов несогласия (ELECTRE II)

	Вариант А3	Вариант В3	Вариант С3	Вариант D3	Вариант Е3	Вариант F3
Вариант А3	-	0,000	0,100	0,200	0,400	0,400
Вариант В3	0,100	0,000	0,200	0,300	0,400	0,400
Вариант С3	0,100	0,000	-	0,100	0,300	0,300
Вариант D3	0,300	0,300	0,200	-	0,500	0,500
Вариант Е3	0,200	0,1	0,2	0,300	-	0,100
Вариант F3	0,300	0,200	0,300	0,400	0,500	-

Для оценки наилучшего варианта схемных решений по компоновке НИО с учетом способов закрепления и сборки применяются значения p и q , равные 0,5 и 0,4 соответственно. В результате сравнения значений ячеек с величинами p и q создана матрица решений, которая приведена в таблице 2.44.

Таблица 2.44 – Матрица решений (ELECTRE II)

	Вариант А3	Вариант В3	Вариант С3	Вариант D3	Вариант Е3	Вариант F3
Вариант А3	-	+	-	+	+	+
Вариант В3	-	-	-	+	+	+
Вариант С3	+	+	-	+	+	+
Вариант D3	+	+	+	-	-	-
Вариант Е3	+	+	+	+	-	-
Вариант F3	-	+	-	+	-	-

Анализируя матрицы индексов согласия, несогласия и решений, следует отметить, что вариант А3 превосходит вариант В3 и С3 по всем критериям, так как индекс согласия является бесконечностью, однако по сравнению с другими вариантами имеет разные индексы. Также матрица решений показывает, что некоторые пары вариантов имеют одинаковые степени превосходства относительно других вариантов: А3 и Е3, В3 и D3. Для точного выявления наилучшего варианта между этими парами необходимо использовать следующие данные: $\sum I_{jk}^+$ и $\sum I_{jk}^-$. Для выбора наилучшего варианта сравниваются соотношения этих показателей, которые показывают степень превосходства того или иного варианта по сравнению с другими. Таким образом, результатом ELECTRE(II)-доминирования альтернатив для схемных решений по компоновке НИО с учетом способов закрепления и сборки является следующее: С3-Е3-А3-D3-В3-F3.

Результаты ELECTRE(II)-доминирования альтернатив по всем схемным решениям НИО геохода приведены на рисунке 2.19.

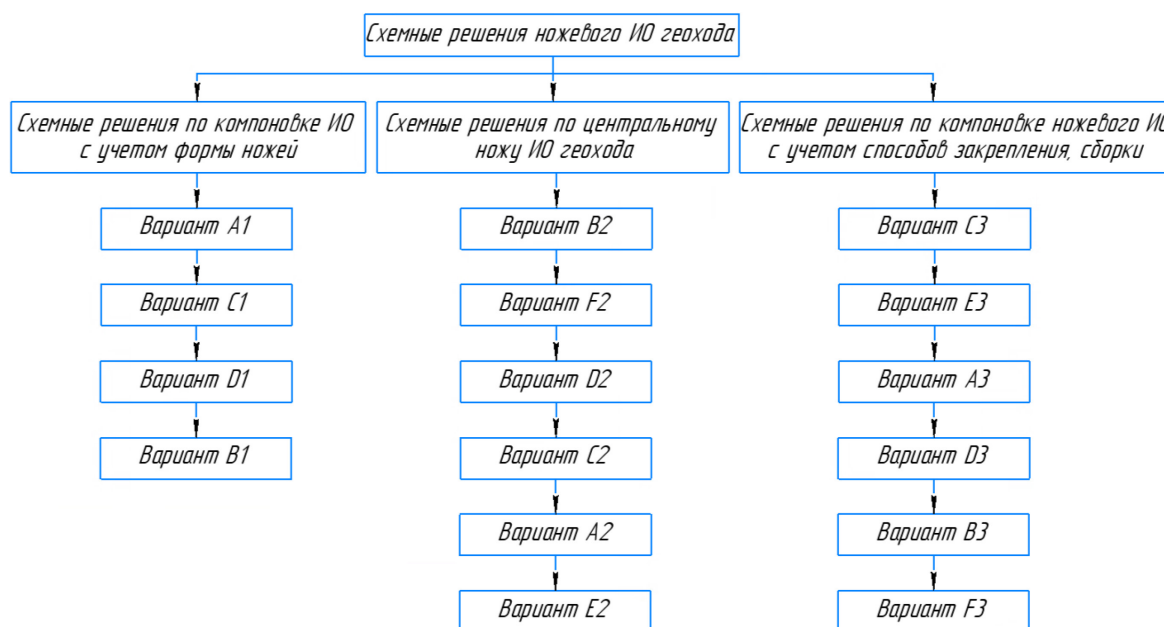


Рисунок 2.19 – Результаты ELECTRE(II)-доминирования альтернатив для схемных решений НИО геохода

По результатам ELECTRE(II)-доминирования по каждой группе схемных решений и сравнении различных вариантов выявлены предпочтительные альтернативы, обладающие наилучшими показателями по критериям оценки. Это

позволяет обеспечивать более обоснованный выбор, учитывающий многокритериальные требования, и способствует более эффективному принятию решений в проектировании и производстве НИО геохода.

2.6 Выводы

1. Дополнены основные требования к ИО геохода с учетом ключевых элементов, материалов для создания элементов, технологических особенностей конструкции, условий эксплуатации и специфики работы геохода.

2. Разработаны схемные решения НИО геохода и его элементов, которые обеспечивают такие требования, как эффективность работы НИО, условия эксплуатации, транспортируемость, а также возможность замены и ремонта в ограниченных подземных условиях.

3. Определены геометрические параметры поперечного сечения ножа исполнительного органа геохода, зависимость углов наклона α и α_1 от угла заострения ε показывает, что при $\delta=30^\circ$ для достижения $\alpha=6^\circ$ необходимо иметь α_1 в диапазоне $19...20^\circ$; при $\delta=32^\circ$ для $\alpha=8^\circ$ – в диапазоне $22...23^\circ$, углы наклона α_1 в диапазоне $19...23^\circ$ являются целесообразными, поскольку они позволяют обеспечивать принятые значения заднего угла и соответствуют установленным требованиям для эффективной работы агрегата с учетом особенностей условий его эксплуатации.

4. В ходе анализа схемных решений получены результаты ELECTRE(II)-доминирования альтернатив для схемных решений НИО геохода, которые показали, что наиболее полно отвечают требованиям следующие: прямая и полувыпуклая геликоидная форма ножей для компоновки ИО геохода; центральный нож в виде кольца и в виде режущего инструмента цилиндрической формы; схемное решение по компоновке НИО с учетом способов закрепления, в котором предполагается выполнить отвал и нож ИО с уступом, базирование происходит по данной поверхности, закрепление будет осуществляться также

винтами со стороны заднего угла наклона ножа и с разделением режущей кромки ИО на определенные сегменты (ножи).

5. Проведенные исследования с учетом параметров площадки износа позволяют утверждать, что изменение количества лучей *и* напрямую сказывается на проекциях силовых параметров сопротивления грунта резанию и момента сопротивления, износ ножа исполнительного органа геохода нелинейно зависит от абразивности пород и длины пути резания, что подчеркивает необходимость учета эксплуатационных требований и критериев при разработке и производстве инструмента.

3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕЛИКОИДНЫХ ФОРМ НОЖЕЙ ИО ГЕОХОДА

Для решения поставленной задачи необходимо:

- определить исходные данные для разработки математических моделей;
- разработать математические модели ножей ИО геохода исходя из их сложных геликоидных форм с учетом его работы и условий эксплуатации.

3.1 Формирование исходных данных для разработки математической модели

Для разработки конструкторско-технологических решений и обоснования технологических возможностей получения таких сложных криволинейных форм необходимо разработать математическую модель геликоидной формы режущей кромки ножа ИО геохода. Моделирование режущей кромки геликоидной формы ножа ИО может применяться в разработке управляющих программ для обработки сложных поверхностей, для получения высокой точности при создании ножа и облегчает процесс производства основных элементов НИО геохода.

Для моделирования режущей кромки геликоидной формы ножа ИО геохода в качестве исходных данных рассматриваем форму ножа прямого геликоида, где при изменении положения сечения на один шаг по длине ножа поперечное сечение ножа поворачивается на угол β (рисунок 3.1).

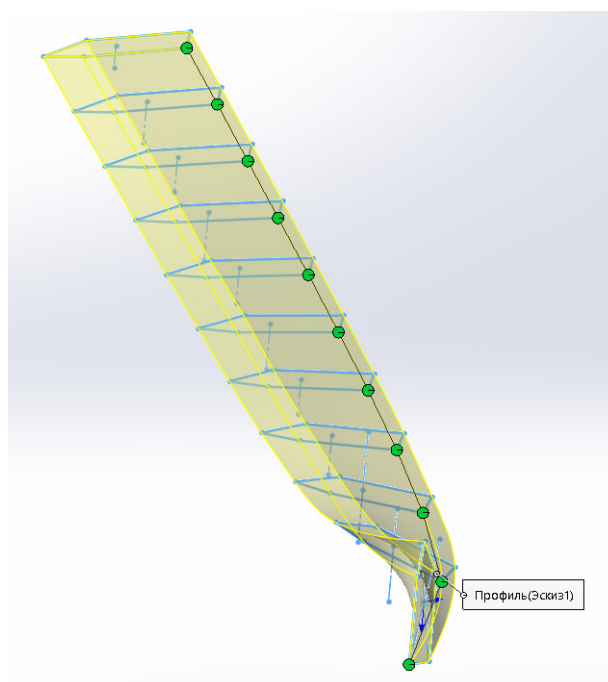


Рисунок 3.1 – Формирование геликоидной формы ножа ИО геохода

В качестве примера рассматривается нож геликоидной формы длиной 900 мм с углом поворота β , в градусах от $5,05^\circ$ и до 90° , с шагом вдоль длины ножа 90 мм. Методики построения геликоидной формы ножа предлагается авторами в различных источниках [27, 56-57]. По формуле (1.1) получены значения угла поворота для каждого поперечного сечения, который зависит от расстояния от оси вращения геохода до рассматриваемой точки в сечении r_x , и параметра h_z по длине ножа. Формула (1.1) показывает, что в центре геохода, т. е., когда $r_x=0$, тангенс угла поворота будет приближается к бесконечности, поэтому в центре принимаем $r_x=0,001$, тогда $h_z=900$ мм, а $\beta=90^\circ$. Полученные значения приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения изменения параметров сечения ножа

r_x	900	810	720	630	540	450	360	270	180	90	0,001
h_z	0	90	180	270	360	450	540	630	720	810	900
β	5,0529	5,6109	6,3069	7,1991	8,3831	10,0284	12,4647	16,4219	23,8501	41,4829	90

По полученным данным выявлена зависимость (рисунок 3.2) угла поворота поперечного сечения ножа от расстояния от оси вращения геохода до рассматриваемой точки в сечении.

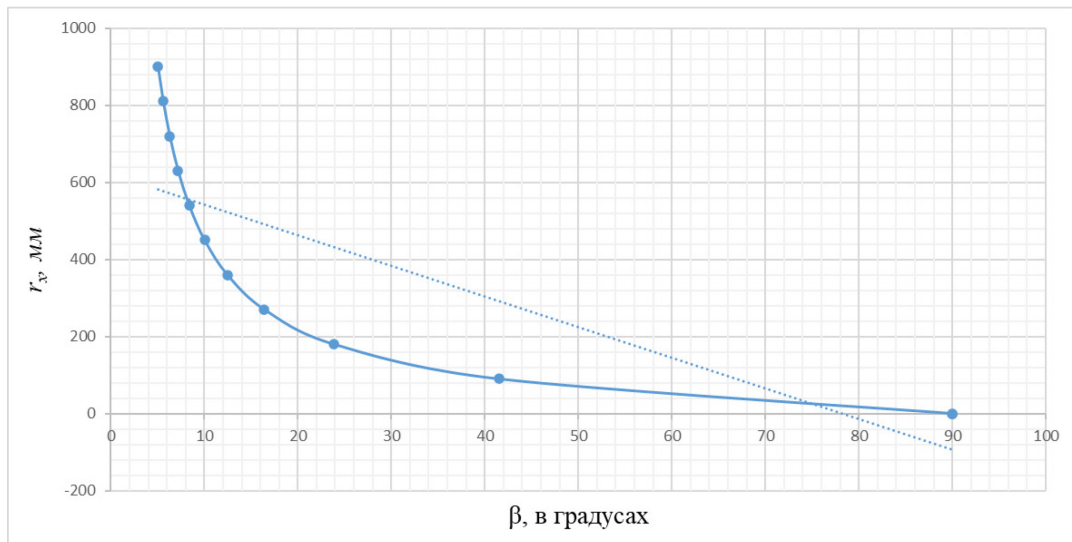


Рисунок 3.2 – Зависимость угла поворота поперечного сечения ножа от расстояния от оси вращения геохода до рассматриваемой точки в сечении

Из полученных данных выявляется функция зависимости параметров r_x и угла поворота β . Функция $\beta(r_x)$ показывает, что регрессия является кубической, а коэффициент корреляции составляет 0,982689, коэффициент детерминации – 0,965679. Отмечается высокая степень связи между β и r_x , и наблюдается положительная корреляция, если значение переменной r_x будет возрастать, то и выходная переменная β также будет увеличиваться.

Для моделирования режущей кромки выпуклой геликоидной формы ножа ИО геохода учитывается, что сечение ножа при перемещении на определенный шаг по дуге ножа поворачивается на угол β , зависящий от его расстояния до оси вращения геохода. Перемещение по дуге ножа задается параметром φ (рисунок 3.3).

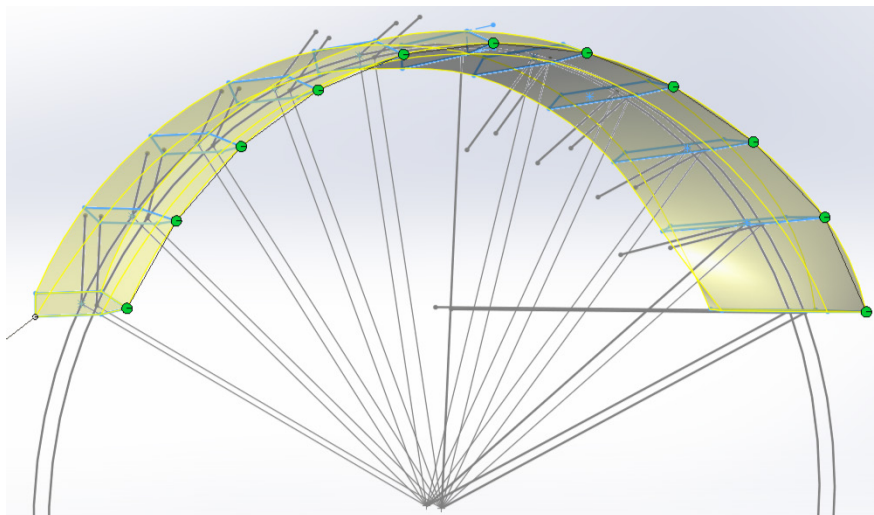


Рисунок 3.3 – Формирование выпуклой геликоидной формы ножа ИО геохода

Методика построения 3D модели ножей различной формы изложена в работах [58-59]. Предлагается новая аналитическая методика, основанная на использовании метода преобразования координат с помощью матриц.

Исходными данными для формирования полувыпуклой формы ножа ИО является хорда дуги окружности. Для ее определения заданными параметрами является величина h_c , которая характеризует степень выпуклости ИО геохода и его взаимодействия с внешней средой (рисунок 3.4). Также необходимо задать диаметр геохода (длина хорды) D_Γ . Исходя из этих параметров и взаимосвязи между ними определяются размеры полувыпуклой формы ИО геохода, такие как радиус окружности, по которой изгибается нож, и центральный угол образующего профиль φ_{max} , опирающийся на хорду.

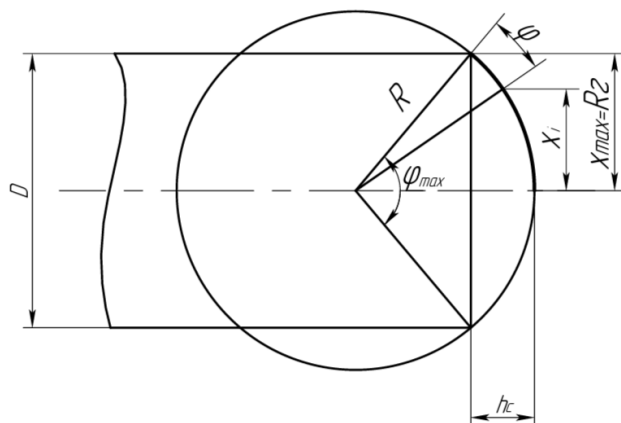


Рисунок 3.4 – Схема формирования полувыпуклой формы НИО геохода
Длину хорды (диаметр геохода) D_Γ следует выразить через радиус окружности и центральный угол образующего профиль ножа, на который опирается хорда:

$$D_\Gamma = 2 \cdot R \cdot \sin \frac{\varphi_{max}}{2}. \quad (3.1)$$

Параметр h_c (высота сегмента) следует также выразить через радиус окружности и центральный угол:

$$h_c = R \cdot (1 - \cos \frac{\varphi_{max}}{2}). \quad (3.2)$$

Принимаем в качестве примера следующие заданные параметры: $D_\Gamma = 1800\text{мм}$, $h_c = 300\text{мм}$.

Определяем центральный угол образующего профиль ножа и радиус дуги окружности, выполняя следующие действия:

$$\begin{cases} 2 \cdot R \cdot \sin \frac{\varphi_{max}}{2} = 1800 \\ R \cdot \left(1 - \cos \frac{\varphi_{max}}{2}\right) = 300 \end{cases}, \quad (3.3)$$

$$R = \frac{300}{1 - \cos \frac{\varphi_{max}}{2}}, \quad (3.4)$$

$$2 \cdot \frac{300}{1 - \cos \frac{\varphi_{max}}{2}} \cdot \sin \frac{\varphi_{max}}{2} = 1800, \quad (3.5)$$

$$2 \cdot 300 \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \frac{\varphi_{max}}{2}} = 1800 \cdot (1 - \cos \frac{\varphi_{max}}{2}), \quad (3.6)$$

$$10 \cos^2 \frac{\varphi_{max}}{2} - 18 \cos \frac{\varphi_{max}}{2} + 8 = 0. \quad (3.7)$$

Используя заданные параметры из выражений (6) для геохода $D_r = 1800$ мм, получим $R = 1500$ мм, $\varphi_{max} \approx 73,74^\circ$. Для формирования сечений по дуге равномерно рассчитываем угол наклона для каждого сечения:

$$\frac{180 - \varphi_{max}}{2} = 53,13^\circ$$

По полученным геометрическим параметрам определяем положение сечения полувыпуклой формы ножа исполнительного органа геохода, как показано на рисунке 3.5 в эскизе изгиба для полувыпуклой формы.

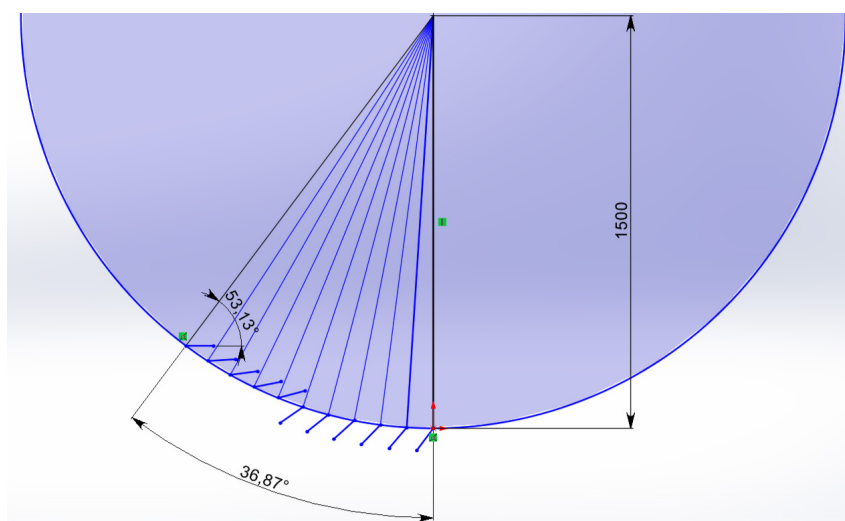


Рисунок 3.5 – Эскиз изгиба для полувыпуклой формы

Для получения твердотельной модели ножа полувыпуклой формы необходимо создать два эскиза изгиба и задать расстояние между ними. Дополнительно задаются плоскости, на которых будут располагаться сечения ножа ИО. На каждой плоскости создается эскиз, где зарисовывается профиль сечения ножа в полувыпуклой форме (рисунок 3.6). С использованием команды «Бабышка/основания по сечениям» в CAD-системе получается твердотельная модель для данной геометрической формы.

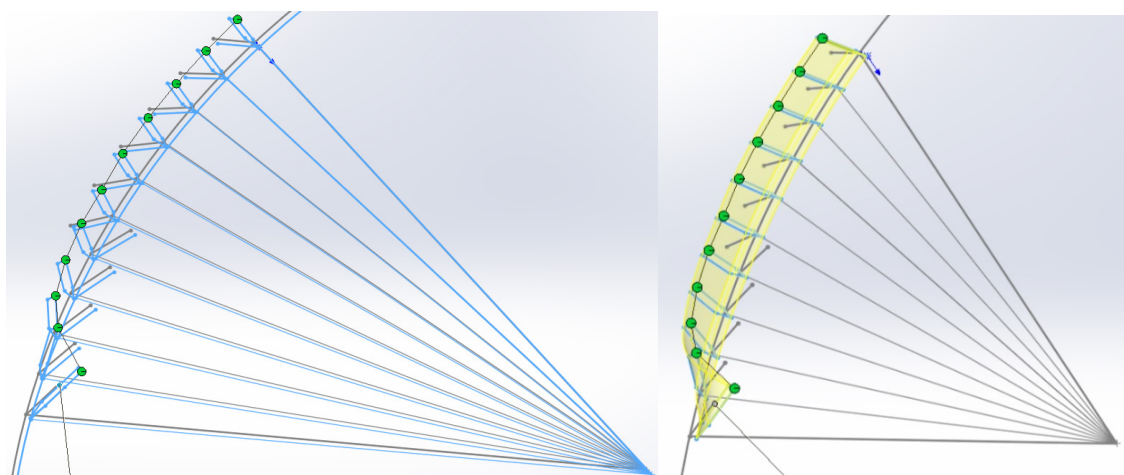


Рисунок 3.6 – Формирование выпуклой геликоидной формы ножа ИО геохода

3.2 Разработка математической модели прямого геликоидного ножа исполнительного органа геохода с учетом его работы и условий эксплуатации

Рассматриваются положения сечения ножа, которые приведены на рисунке 3.7. На нем показаны две декартовы прямоугольные системы координат. Система координат $x_0y_0z_0$ – неподвижная, жестко связана с исходным положением сечения ножа при β , равном нулю, вторая – подвижная система координат $x_1y_1z_1$ связана с сечением ножа, положение которого меняется с поворотом на угол β по мере перемещения сечения по длине ножа на расстояние h_z от неподвижной системы координат.

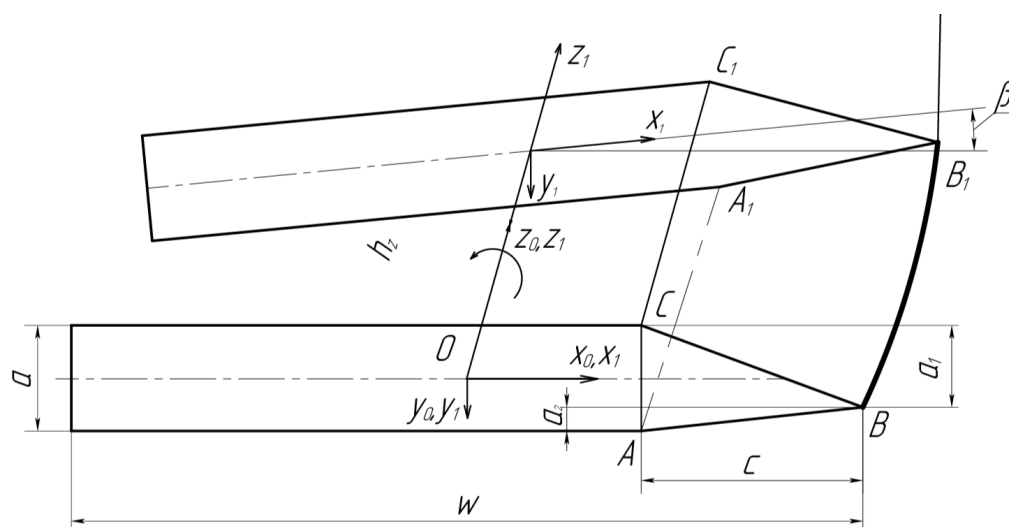


Рисунок 3.7 – Неподвижная и подвижная системы координат, принятые в исследовании

Оси z_0 и z_1 обеих систем направлены вдоль длины ножа и совпадают. Оси x_0

и x_1 направлены вдоль продольной оси сечения. При $\beta=0$ оси двух систем совпадают. Для формирования режущей кромки ножа рассматриваются точки сечения A, B, C . При перемещении сечения на один шаг h_z сечение поворачивается на угол β . На рисунке 3.8 изображено новое положение этих точек A_l, B_l, C_l .

Для определения уравнений движения точек используем матричный метод преобразований координат [59-62]. Для преобразований используем матрицу размером 4×4 , которая позволяет учитывать выше названное движение сечения по отношению к неподвижной системе координат. Матрица преобразований координат от подвижной системы (с индексом 1) к неподвижной (с индексом 0) имеет вид:

$$M_{01} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.8)$$

Вектор, составленный из координат каждой точки в системах $x_1 y_1 z_1$ и $x_0 y_0 z_0$, имеет вид соответственно:

$$\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

$$\vec{r}_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.10)$$

Преобразование координат точки записывается в виде:

$$\vec{r}_0 = M_{01} \cdot \vec{r}_1. \quad (3.11)$$

Подставляя (3.8), (3.9), (3.10) в выражение (3.11), получим:

$$\vec{r}_0 = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_z \cdot \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \cdot \cos \beta + y_1 \cdot \sin \beta \\ -x_1 \cdot \sin \beta + y_1 \cdot \cos \beta \\ h_z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.12)$$

Следовательно, уравнение координат точек сечения ножа имеет вид:

$$\begin{cases} x_0 = x_1 \cdot \cos \beta + y_1 \cdot \sin \beta \\ y_0 = -x_1 \cdot \sin \beta + y_1 \cdot \cos \beta \\ z_0 = h_z \end{cases} \quad (3.13)$$

Полученная система уравнения (6) является исходной системой уравнений для получения координат точек A, B, C ножа ИО прямого геликоида.

В данной системе существует две переменные, то есть координаты точек будут зависеть от h_z , перемещения по оси z и угла поворота β . Для дальнейшего упрощения системы уравнений используем формулу, которая связывает расстояние от каждой точки ножа до оси вращения геохода при его перемещении на забой с углом поворота сечения β [8, 25, 63-65]:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h_B}{2 \cdot \pi \cdot x}, \quad (3.14)$$

где h_B – шаг внешнего движителя геохода, x – расстояние от оси вращения геохода до точки на его режущей кромке.

Для преобразования уравнений (3.13) используются следующие тригонометрические выражения:

$$\cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2 \beta}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{h_B}{2 \cdot \pi \cdot x}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot x^2 + h_B^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot x^2}}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\sqrt{h_B^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot x^2}}, \quad (3.15)$$

$$\sin \beta = \frac{1}{\sqrt{1+\operatorname{ctg}^2 \beta}} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta}}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{h_B}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{h_B^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot x^2}{h_B^2}}} = \frac{h_B}{\sqrt{h_B^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot x^2}}. \quad (3.16)$$

Расстояние от оси вращения геохода до текущей точки на его режущей кромке:

$$x = r_{\max} - h_z, \quad (3.17)$$

где $r_{\max}$ – расстояние от оси вращения геохода до крайней точки на его режущей кромке – радиус геохода.

Подставляя полученные выражения (3.15), (3.16) и (3.17) в систему уравнений точек (3.13), получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} x_0 = x_1 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\sqrt{h_B^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (r_{\max} - h_z)^2}} + y_1 \cdot \frac{h_B}{\sqrt{h_B^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (r_{\max} - h_z)^2}} \\ y_0 = -x_1 \cdot \frac{h_B}{\sqrt{h_B^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (r_{\max} - h_z)^2}} + y_1 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\sqrt{h_B^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (r_{\max} - h_z)^2}} \\ z_0 = h_z \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (r_{\max} - h_z)^2}} (x_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot (r_{\max} - h_z) + y_1 \cdot h_B) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (r_{\max} - h_z)^2}} (-x_1 \cdot h_B + y_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot (r_{\max} - h_z)) \\ z_0 = h_z \end{cases} \quad (3.19)$$

Система уравнений определяет в системе $x_0y_0z_0$ координаты точек сечения ножа, которое поворачивается под углом β и при этом совершает прямолинейное движение по оси ножа в зависимости от h_z .

Далее для моделирования режущей кромки рассматривается поперечное сечение ножа ИО (рисунок 3.8).

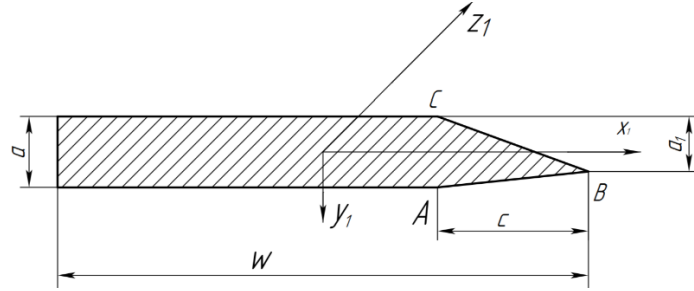


Рисунок 3.8 – Поперечное сечение прямого геликоидного ножа ИО геохода
Исходя из параметров сечения ножа ИО, необходимо определить начальные координаты для крайних точек режущей кромки. В качестве исходных данных для решения полученной системы уравнений принимаются определенные геометрические параметры режущей кромки ножа ИО в п. 2.2.

Для определения взаимосвязи между координатами точек режущей кромки и формирования режущей кромки с параметрами сечения поперечного сечения ножа определяются начальные координаты точек через линейные параметры сечения w , a и c . Для точки B начальные координаты будут равны:

$$x_1 = \frac{w}{2}, \quad (3.20)$$

$$y_1 = a_1 - \frac{a}{2}. \quad (3.21)$$

Подставляя полученное выражение в систему уравнений, получаем следующее:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{h_z^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (r_{max} - h_z)^2}} \left(\frac{w}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (r_{max} - h_z) + \left(a_1 - \frac{a}{2} \right) \cdot h_z \right) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{h_z^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (r_{max} - h_z)^2}} \left(-\frac{w}{2} \cdot h_z + \left(a_1 - \frac{a}{2} \right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot (r_{max} - h_z) \right) \\ z_0 = h_z \end{cases} \quad (3.22)$$

Для точки C начальные координаты в неподвижной пространственной системе будут равны:

$$x_1 = \frac{w}{2} - c, \quad (3.23)$$

$$y_1 = -\frac{a}{2}. \quad (3.24)$$

Подставляя полученное выражение в систему уравнений, получаем следующее:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{h_6^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (r_{max} - h_z)^2}} \left(\left(\frac{w}{2} - c \right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot (r_{max} - h_z) - \frac{a}{2} \cdot h_b \right), \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{h_6^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (r_{max} - h_z)^2}} \left(\left(c - \frac{w}{2} \right) \cdot h_b - \frac{a}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (r_{max} - h_z) \right), \\ z_0 = h_z. \end{cases} \quad (3.25)$$

Для точки A начальные координаты в неподвижной пространственной системе будут равны:

$$x_1 = \frac{w}{2} - c, \quad (3.26)$$

$$y_1 = \frac{a}{2}. \quad (3.27)$$

Подставляя полученное выражение в систему уравнений, получаем следующее:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{h_6^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (r_{max} - h_z)^2}} \left(\left(\frac{w}{2} - c \right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot (r_{max} - h_z) + \frac{a}{2} \cdot h_b \right) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{h_6^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot (r_{max} - h_z)^2}} \left(\left(c - \frac{w}{2} \right) \cdot h_b + \frac{a}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (r_{max} - h_z) \right) \\ z_0 = h_z. \end{cases} \quad (3.28)$$

По заданным параметрам поперечного сечения ножа были получены начальные координаты точек для решения системы уравнений, которые приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значение параметров и начальные координаты точек режущей кромки ножа

Параметры сечения ножа				Точки в режущей кромки ножа	Координаты	
w, мм	c, мм	a, мм	a ₁ , мм		x ₁	y ₁
150	42,65	20	14,48	B	75	4,48
				C	32,25	-10
				A	32,35	10

3.3 Разработка математической модели выпуклого геликоидного ножа исполнительного органа геохода с учетом его работы и условий эксплуатации

Рассматривается положение выпуклого ножа, которое приведено на рисунке 3.9, на нем указаны три декартовы прямоугольные системы координат. Декартова

система координат $x_0y_0z_0$ является неподвижной и жестко связана с исходным положением сечения ножа. Декартова система координат $x_1y_1z_1$ является подвижной и связана с положением сечения ножа, характеризуемого углом φ . Система координат $x_2y_2z_2$ жестко связана с текущим положением сечения ножа, повернутого под углом β вокруг оси z_1 .

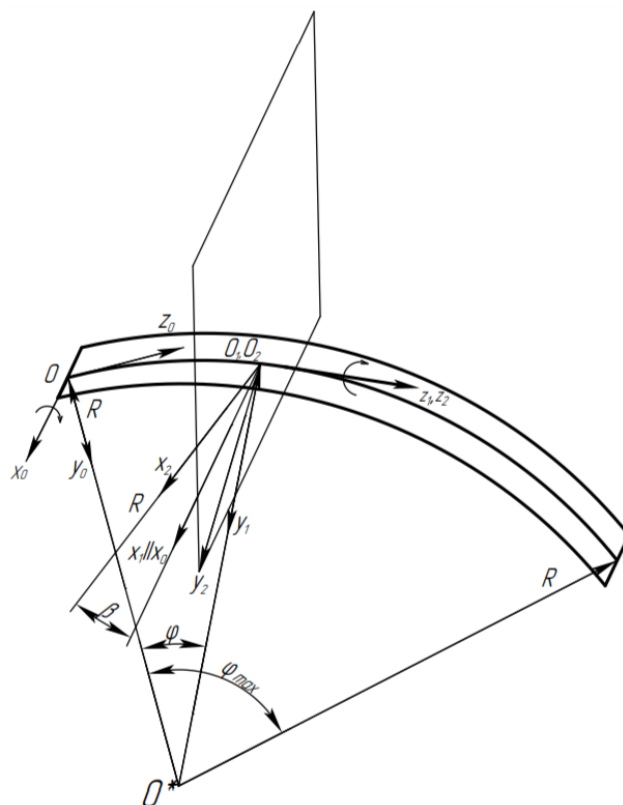


Рисунок 3.9 – Неподвижная и подвижная системы координат в сечении ножа для выпуклой формы

Оси z в системах координат направлены по касательным к дуге изгиба ножа по радиусу R . Оси x_0 и x_1 остаются параллельными при перемещении сечения вдоль дуги ножа и перпендикулярны плоскости, в которой лежит дуга ножа. Оси z_1 , z_2 всегда совпадают и направлены перпендикулярно к сечению ножа. Оси системы x_2 , y_2 , жестко связанные с сечением ножа, поворачиваются вместе с ним на угол β вокруг оси z_1 в зависимости от угла φ .

Для определения уравнений движения характерных точек ножа используем матричный метод преобразований координат [60-62]. Для преобразований используем матрицу размером 4×4 , которая позволяет учитывать отмеченный ранее характер движения сечения по отношению к неподвижной системе координат.

Матрица преобразований координат от подвижной системы (с индексом 2) к подвижной (с индексом 1) имеет вид:

$$M_{12} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.29)$$

Матрица преобразований координат от подвижной системы (с индексом 1) к неподвижной (с индексом 0) имеет вид:

$$M_{01} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 2R \sin^2 \frac{\varphi}{2} \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & R \sin \varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.30)$$

Вектор, составленный из координат каждой точки в системах x_2, y_2, z_2 и x_0, y_0, z_0 , имеет вид соответственно:

$$\vec{r}_2^{(i)} = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.31)$$

Преобразование координат точки записывается в виде:

$$\vec{r}_0^{(i)} = M_{01} \cdot M_{12} \cdot \vec{r}_2^{(i)}. \quad (3.32)$$

Преобразование координат точки имеет вид:

$$\vec{r}_0^{(i)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 2R \sin^2 \frac{\varphi}{2} \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & R \sin \varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

$$\vec{r}_0^{(i)} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\cos \varphi \cdot \sin \beta & \cos \varphi \cdot \cos \beta & \sin \varphi & 2R \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2} \\ \sin \beta \cdot \sin \varphi & -\sin \varphi \cdot \cos \beta & \cos \varphi & R \cdot \sin \varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.34)$$

Следовательно, уравнение координат точек имеет вид:

$$\begin{cases} x_0 = x_2 \cdot \cos \beta + y_2 \cdot \sin \beta \\ y_0 = -x_2 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta + y_2 \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta + 2R \sin^2 \frac{\varphi}{2} \\ z_0 = x_2 \cdot \sin \beta \cdot \sin \varphi - y_2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta + R \cdot \sin \varphi \end{cases} \quad (3.35)$$

Для определения взаимосвязи между параметрами сечения ножа и параметрами выпуклой геликоидной формы ножа ИО необходимо рассмотреть схемы, которые приведены на рисунке 3.10.

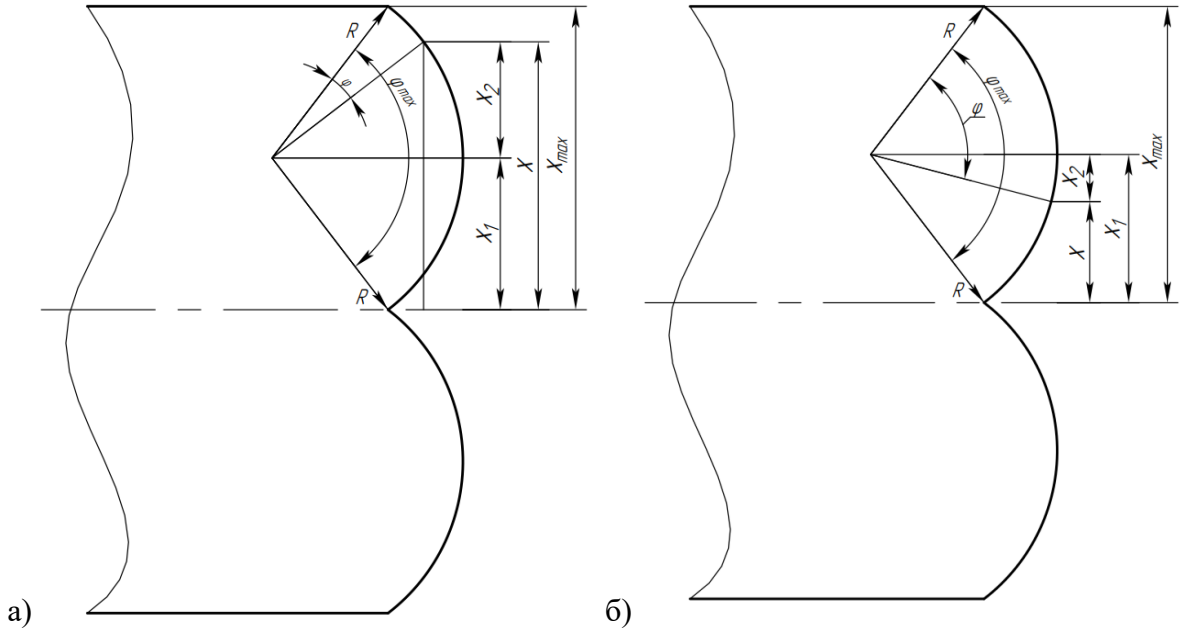


Рисунок 3.10 – Эскиз НИО геохода с выпуклыми ножами

Для каждой точки ножа, которая находится от оси вращения геохода на расстоянии x , определяется параметр согласно формуле 3.14.

Рассматриваются два случая. В первом точка находится до середины дуги выпуклой формы. Расстояние x через параметры выпуклой формы.

$$x = x_1 + x_2. \quad (3.36)$$

$$\frac{x_1}{R} = \sin \frac{\varphi_{max}}{2}. \quad (3.37)$$

$$\frac{x_2}{R} = \sin \left(\frac{\varphi_{max}}{2} - \varphi \right). \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} x = x_1 + x_2 &= R \cdot \sin \frac{\varphi_{max}}{2} + R \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{max}}{2} - \varphi \right) = \\ &= R \cdot \left(\sin \frac{\varphi_{max}}{2} + \sin \left(\frac{\varphi_{max}}{2} - \varphi \right) \right). \end{aligned} \quad (3.39)$$

Во втором случае точка находится после середины дуги ножа выпуклой формы. Определяем расстояние x через параметры выпуклой формы:

$$x = x_1 - x_2. \quad (3.40)$$

$$\frac{x_1}{R} = \sin \frac{\varphi_{max}}{2}. \quad (3.41)$$

$$\frac{x_2}{R} = \sin \left(\varphi - \frac{\varphi_{max}}{2} \right). \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} x = x_1 - x_2 &= R \cdot \sin \frac{\varphi_{max}}{2} - R \cdot \sin \left(\varphi - \frac{\varphi_{max}}{2} \right) = R \cdot \left(\sin \frac{\varphi_{max}}{2} - \sin \left(- \left(\frac{\varphi_{max}}{2} - \varphi \right) \right) \right) = \\ &= R \cdot \left(\sin \frac{\varphi_{max}}{2} + \sin \left(\frac{\varphi_{max}}{2} - \varphi \right) \right). \end{aligned} \quad (3.43)$$

Исходя из полученных выражений (2.40) (2.44) и (2.48), записываются следующие:

$$tg\beta = \frac{h_B}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \left(\sin \frac{\varphi_{max}}{2} + \sin \left(\frac{\varphi_{max}}{2} - \varphi \right) \right)}, \text{ или} \quad (3.44)$$

$$tg\beta = \frac{h_B}{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}}. \quad (3.45)$$

При использовании выражений (2.50) учтем выражения:

$$\cos\beta = \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2\beta}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h_B}{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}} \right)^2}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}}. \quad (3.46)$$

$$\sin\beta = \frac{1}{\sqrt{1 + ctg^2\beta}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{tg^2\beta}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h_B}{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}} \right)^2}} = \frac{h_B}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}}. \quad (3.47)$$

Подставляя полученные выражения (3.46), (3.47) в систему выражений (5.36) для точек режущей кромки, получаем следующие:

$$\begin{cases} x_0 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} + y_2 \cdot \frac{h_B}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} \\ y_0 = -x_2 \cdot \cos\varphi \cdot \frac{h_B}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} + y_2 \cdot \cos\varphi \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} + 2R \sin^2 \frac{\varphi}{2} \\ z_0 = x_2 \cdot \frac{h_B}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} \cdot \sin\varphi - y_2 \cdot \sin\varphi \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} + R \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (3.48)$$

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} \cdot (x_2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2} + y_2 \cdot h_B) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} \cdot (-x_2 \cdot \cos\varphi \cdot h_B + y_2 \cdot \cos\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}) + 2R \sin^2 \frac{\varphi}{2} \\ z_0 = \frac{1}{\sqrt{h_B^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} \cdot (x_2 \cdot h_B \cdot \sin\varphi - y_2 \cdot \sin\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}) + R \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (3.49)$$

Полученная система выражений (3.49) координат точек описывает координаты точек сечения выпуклого ножа, которое поворачивается под углом β вокруг оси z_I при его перемещении по дуге окружности радиусом R на угол φ . Далее для моделирования режущей кромки рассматривается поперечное сечение ножа ИО (рисунок 3.8).

Для формирования режущей кромки ножа выпуклой геликоидной формы ИО необходимо определить координаты для крайних точек кромки A , B , C , которые являются исходными данными для использования в полученной системе уравнений преобразования координат. Эти данные были определены исходя из рациональных параметров режущей кромки ножа ИО в п. 2.2.

Используя выражения, которые определяют координаты точек по режущей кромке ножа ИО, определяется взаимосвязь между изменениями положения сечения и параметрами выпуклой формы ножа ИО. Для этого определяем начальные координаты для каждой точки в неподвижной пространственной системе через параметры сечения, исходя из оптимальной геометрии ножа ИО. Для вершины ножа (точка B) начальные координаты в неподвижной пространственной системе будут находиться по формулам (3.20) и (3.21).

Подставляя выражения (3.20) и (3.21) в систему уравнений, получаем следующее:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{h_b^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\frac{w}{2} \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2} + \left(a_1 - \frac{a}{2}\right) \cdot h_b\right) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{h_b^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(-\frac{w}{2} \cdot \cos\varphi \cdot h_b + \left(a_1 - \frac{a}{2}\right) \cdot \cos\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2} + 2R \sin^2\frac{\varphi}{2}\right) \\ z_0 = \frac{1}{\sqrt{h_b^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\frac{w}{2} \cdot h_b \cdot \sin\varphi - \left(a_1 - \frac{a}{2}\right) \cdot \sin\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2} + R \cdot \sin\varphi\right) \end{cases} \quad (3.50)$$

Для точки C начальные координаты будут определены по формуле (3.23) и (3.24).

Подставляя выражение (3.23) и (3.24) в систему уравнений, получаем следующее:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{h_b^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\left(\frac{w}{2} - c\right) \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2} - \frac{a}{2} \cdot h_b\right) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{h_b^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\left(c - \frac{w}{2}\right) \cdot \cos\varphi \cdot h_b - \frac{a}{2} \cdot \cos\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2} + 2R \sin^2\frac{\varphi}{2}\right) \\ z_0 = \frac{1}{\sqrt{h_b^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos^2\frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\left(\frac{w}{2} - c\right) \cdot h_b \cdot \sin\varphi + \frac{a}{2} \cdot \sin\varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{max}-\varphi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\varphi}{2} + R \cdot \sin\varphi\right) \end{cases} \quad (3.51)$$

Начальные координаты точки A для выпуклого ножа будут такие же, как и прямого, согласно (3.26) и (3.27).

Подставляя выражение (3.26) и (3.27) в систему уравнений, получаем следующее:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{h_6^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2}\right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\left(\frac{w}{2} - c\right) \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2}\right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2} + \frac{a}{2} \cdot h_b\right) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{h_6^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2}\right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\left(c - \frac{w}{2}\right) \cdot \cos \varphi \cdot h_b + \frac{a}{2} \cdot \cos \varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2}\right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}\right) + 2R \sin^2 \frac{\varphi}{2} \\ z_0 = \frac{1}{\sqrt{h_6^2 + 16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2}\right) \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2}}} \cdot \left(\left(\frac{w}{2} - c\right) \cdot h_b \cdot \sin \varphi - \frac{a}{2} \cdot \sin \varphi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{max} - \varphi}{2}\right) \cdot \cos \frac{\varphi}{2}\right) + R \cdot \sin \varphi \end{cases} \quad (3.52)$$

По заданным параметрам поперечного сечения ножа выпуклой геликоидной формы были получены начальные координаты точек для решения системы уравнений, которые приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Значение параметров и начальные координаты точек режущей кромки ножа выпуклой геликоидной формы

Конструктивные параметры ножа выпуклой геликоидной формы						Точки в режущей	Координаты	
w , мм	c , мм	a , мм	al , мм	φ , в градусах	R , мм	кромки ножа	x_l , мм	y_l , мм
150	42,65	20	15,52	0-128,92	400	B	75	5,52
						C	32,35	-10
						A	32,35	10

3.4 Разработка математической модели полувыпуклого геликоидного ножа исполнительного органа геохода с учетом его работы и условий эксплуатации

Характер изменения точек для выпуклого и полувыпуклого геликоидного ножа может включать в себя как изменение углов наклона, так и расстояний между точками реза, что напрямую влияет на эффективность и качество работы ножа. Для полувыпуклого ножа уравнение координат точек имеет такой же вид как для выпуклого ножа (3.35).

Для определения взаимосвязи между параметрами сечения ножа и параметрами геликоидной формы ножа ИО, исходя из схемы (рисунок 3.4), следует отметить следующее:

$$\begin{aligned} \frac{x}{R} &= \sin\left(\frac{\varphi_{max}}{2} - \varphi\right), \\ x &= R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{max}}{2} - \varphi\right). \end{aligned} \quad (3.53)$$

Угол поворота сечения ножа в зависимости от расстояния от оси геохода определяется из выражения:

$$tg\beta = \frac{h_b}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{max}}{2} - \varphi\right)}. \quad (3.54)$$

Для использования выражений (14) учтем, что:

$$\cos\beta = \frac{1}{\sqrt{1+tg^2\beta}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{h_B}{2\pi R \sin(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{h_B^2}{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)}}} = \frac{2\pi R \sin(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)}{\sqrt{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)+h_B^2}} \quad (3.55)$$

$$\sin\beta = tg\beta \cdot \cos\beta = \frac{h_B}{2\pi R \sin(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)} \cdot \frac{2\pi R \sin(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)}{\sqrt{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)+h_B^2}} = \frac{h_B}{\sqrt{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)+h_B^2}} \quad (3.56)$$

Подставляя полученные выражения (3.55) и (3.56) в систему выражений (3.35), получим:

$$\begin{cases} x_0 = x_2 \cdot \frac{2\pi R \sin(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)}{\sqrt{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)+h_B^2}} + y_2 \cdot \frac{h_B}{\sqrt{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)+h_B^2}} \\ y_0 = -x_2 \cdot \cos\alpha \cdot \frac{h_B}{\sqrt{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)+h_B^2}} + y_2 \cdot \cos\alpha \cdot \frac{2\pi R \sin(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)}{\sqrt{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)+h_B^2}} + 2R \sin^2 \frac{\alpha}{2} \\ z_0 = x_2 \cdot \frac{h_B}{\sqrt{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)+h_B^2}} \cdot \sin\alpha - y_2 \cdot \sin\alpha \cdot \frac{2\pi R \sin(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)}{\sqrt{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)+h_B^2}} + R \cdot \sin\alpha \end{cases} \quad (3.57)$$

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)+h_B^2}} \cdot (x_2 \cdot 2\pi R \sin(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi) + y_2 \cdot h_B) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)+h_B^2}} \cdot (-x_2 \cdot \cos\alpha \cdot h_B + y_2 \cdot \cos\alpha \cdot 2\pi R \sin(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)) + 2R \sin^2 \frac{\varphi}{2} \\ z_0 = \frac{1}{\sqrt{4\pi^2 R^2 \sin^2(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)+h_B^2}} \cdot (x_2 \cdot h_B \cdot \sin\alpha - y_2 \cdot \sin\alpha \cdot 2\pi R \sin(\frac{\varphi_{max}}{2}-\varphi)) + R \cdot \sin\alpha \end{cases} \quad (3.58)$$

Полученная система выражений (3.58) описывает координаты точек полувыпуклого ножа, которые поворачиваются вместе с его поперечным сечением на угол β вокруг оси z_1 при перемещении сечения по дуге окружности радиусом R на угол φ . Далее для моделирования режущей кромки рассматривается поперечное сечение профиля ножа ИО (рисунок 3.8).

Для создания режущей кромки ножа с полувыпуклой геликоидной формой ИО необходимо установить координаты крайних точек кромки, обозначенных как A , B и C . Эти координаты служат отправной точкой для применения сгенерированной системы выражений, которые позволяют преобразовывать координаты.

С помощью выражений, описывающих координаты точек вдоль режущей кромки ножа ИО, устанавливается связь между изменениями положения его сечения и параметрами полувыпуклой формы ножа. Для этого определяются начальные координаты каждой точки в системе координат $x_2 y_2 z_2$, учитывая оптимальную геометрию ножа ИО.

Для точки B система уравнений будет имеет следующий вид:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha) + h_b^2}} \cdot (\frac{w}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha) + (a_1 - \frac{a}{2}) \cdot h_b) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha) + h_b^2}} \cdot (-\frac{w}{2} \cdot \cos \alpha \cdot h_b + (a_1 - \frac{a}{2}) \cdot \cos \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha)) + 2R \sin^2 \frac{\alpha}{2} \\ z_0 = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha) + h_b^2}} \cdot (\frac{w}{2} \cdot h_b \cdot \sin \alpha - (a_1 - \frac{a}{2}) \cdot \sin \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha)) + R \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (3.59)$$

Подставляя (3.23) и (3.24) для точки C в систему уравнений, получаем следующее:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha) + h_b^2}} \cdot ((\frac{w}{2} - c) \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha) - \frac{a}{2} \cdot h_b) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha) + h_b^2}} \cdot ((c - \frac{w}{2}) \cdot \cos \alpha \cdot h_b - \frac{a}{2} \cdot \cos \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha)) + 2R \sin^2 \frac{\alpha}{2} \\ z_0 = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha) + h_b^2}} \cdot ((\frac{w}{2} - c) \cdot h_b \cdot \sin \alpha + \frac{a}{2} \cdot \sin \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha)) + R \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (3.60)$$

Подставляя выражения (3.26) и (3.27) в систему уравнений, получаем следующее:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha) + h_b^2}} \cdot ((\frac{w}{2} - c) \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha) + y_2 \cdot h_b) \\ y_0 = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha) + h_b^2}} \cdot (-x_2 \cdot \cos \alpha \cdot h_b + y_2 \cdot \cos \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha)) + 2R \sin^2 \frac{\alpha}{2} \\ z_0 = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha) + h_b^2}} \cdot (x_2 \cdot h_b \cdot \sin \alpha - y_2 \cdot \sin \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin(\frac{\alpha_{max}}{2} - \alpha)) + R \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (3.61)$$

По заданным параметрам поперечного сечения ножа полувыпуклой геликоидной формы были получены начальные координаты точек для решения системы уравнений, которые приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Значение параметров и начальные координаты точек режущей кромки ножа полувыпуклой геликоидной формы

Конструктивные параметры ножа полувыпуклой геликоидной формы						Точки в режущей	Координаты	
w , мм	c , мм	a , мм	a_l , мм	α , в градусах	R , мм	кромки ножа	x_l , мм	y_l , мм
150	42,65	20	15,52	0-73,74	1500	B	75	5,52
						C	32,35	-10
						A	32,35	10

3.4 Визуализация математической модели

По полученным значениям параметров и координат точек была разработана специальная программа в среде MATLAB для решения системы уравнений (приложение А).

В результате решения системы (3.19) была получена траектория изменения точки B относительно неподвижной пространственной системы координат и для трех точек A , B и C (рисунок 3.11) прямой формы ножа геохода. В данной системе точка B является вершиной режущей кромки прямого геликоидного ножа, точки A и C являются крайними точками, по которым будет затачиваться нож.

Для проверки правильного решения системы уравнений и полученным траекториям движения точек в режущей кромке были заданы определенные параметры в программе: начальные и конечные положения точки режущей кромки.

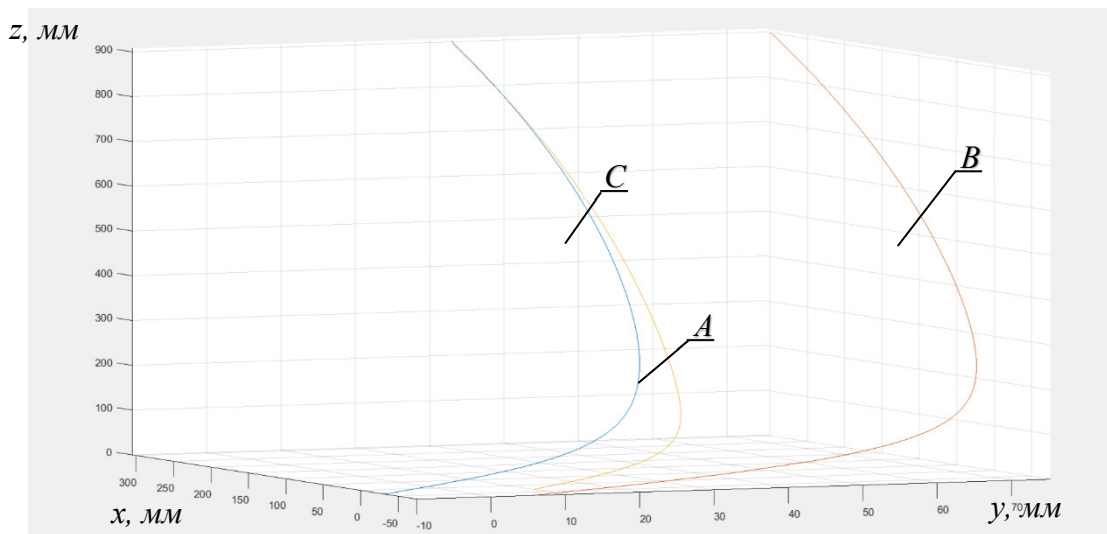


Рисунок 3.11 – График траектории изменения координат точек режущих кромок для прямого геликоидного ножа

По полученным значениям конструктивных параметров и системе уравнений координат точек была разработана специальная программа в среде MATLAB для решения системы (3.50). В результате решения данной системы получена траектория изменения точки режущей кромки ножа выпуклой геликоидной формы относительно начала неподвижной пространственной системы координат (рисунок 3.12).

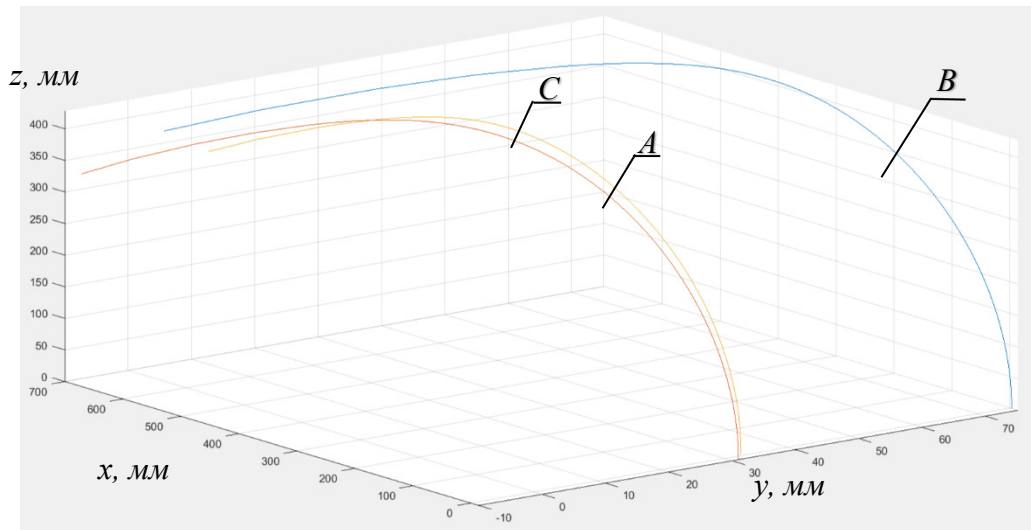


Рисунок 3.12 – График траектории изменения координат точек режущих кромок для выпуклого геликоидного ножа

На основе полученных данных о конструктивных характеристиках и специализированной программе в среде MATLAB в результате анализа был определен путь перемещения точки режущей кромки ножа полувыпуклой формы относительно начала фиксированной пространственной системы координат, как показано на рисунке 3.13. В этой системе точка В представляет собой верхнюю границу режущей кромки, тогда как точки А и С являются крайними точками, по которым будет происходить заточка ножа с полувыпуклой геликоидной формой.

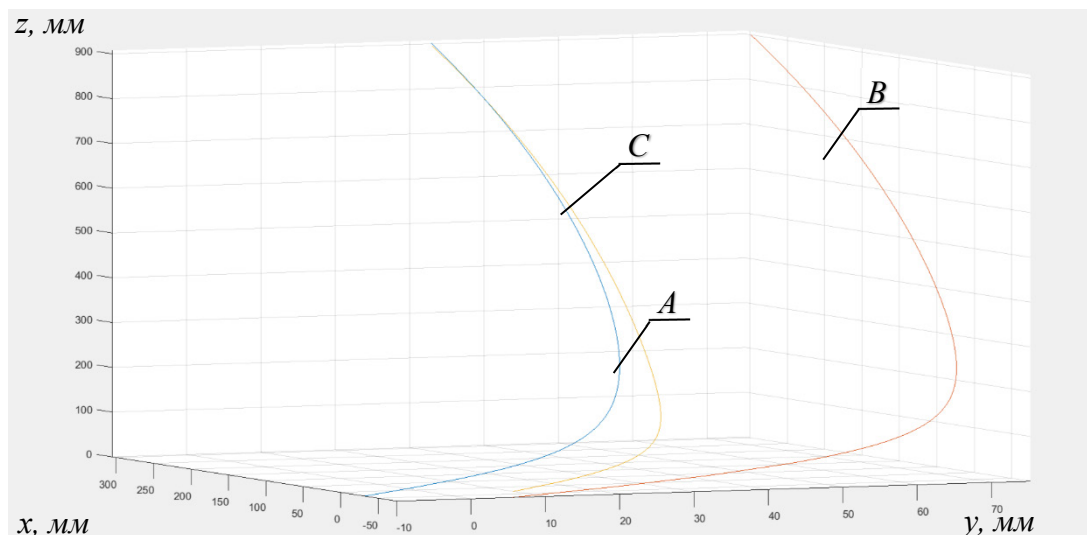


Рисунок 3.13 – График траектории изменения координат точек режущих кромок для полувыпуклого геликоидного ножа

В результате вычисления была определена взаимосвязь между геометрическими параметрами полувыпуклой геликоидной формы ножа ИО и

параметрами сечения ножа для данной формы. По данным параметрам разработана твердотельная модель для полувыпуклой геликоидной формы ножа, которая отвечает всем конструктивным требованиям геохода. В результате математического моделирования по определению координат точек режущих кромок ножа полувыпуклой геликоидной формы ножа ИО, была получена система выражений точек. Выражения были получены методом преобразований координат для характерных точек поперечного сечения ножа. Полученные данные следует использовать при разработке управляющих программ для производства и обработки сложных поверхностей полувыпуклой формы ножа ИО, который обеспечивает высокую точность и качество обработки поверхностей.

3.5 Выводы

1. В результате численного моделирования определены основные конструктивные параметры для формирования геликоидной формы разных ножей: прямой, выпуклой, полувыпуклой. Была выявлена зависимость угла поворота поперечного сечения ножа от расстояния от оси вращения геохода до рассматриваемой точки в сечении. Установлена взаимосвязь между конструктивными параметрами и параметрами изменения сечения ножа, что учитывается в уравнении координаты точек для выпуклой и полувыпуклой формы ножа. В результате геометрического анализа получены выражения, определяющие конструктивные параметры выпуклой и полувыпуклой форм НИО геохода:

- параметр h_c , характеризующий степень выпуклости ИО и его взаимодействие с породой;
- радиус кривизны R , определяющий изогнутую часть ИО;
- центральный угол образующего профиль ножа φ_{max} ;
- текущий угол образующего профиль ножа φ ;
- радиус геохода r_z ;
- расстояние от точки до оси вращения геохода h_z .

2. В результате математического моделирования с помощью метода матричных преобразований была получена система уравнений (3.19) координат точек, которая учитывает поворот сечения под углом β , при этом изменяя прямолинейно по длине ножа прямой геликоидной формы. Учитывая параметры поперечного сечения прямого геликоидного ножа ИО геохода была получена системы уравнений для характерных точек сечения: A (3.28), B (3.22) и C (3.25).

3. Характер изменения координат точек для полувыпуклой и выпуклой форм ножа исполнительного органа является одинаковым и заключается в том, что поворачивается сечение ножа на угол β вокруг оси z_I (перпендикулярно поперечному сечению) при перемещении сечения по дуге окружности радиусом R на определенный угол φ .

4. В результате моделирования движения точек режущих кромок ножа исполнительного органа была получена система уравнений движения этих точек, которые определяют в неподвижной пространственной системе координат матричным методом преобразований. Полученные уравнения можно использовать для определения траектории движения любой точки сечения ножа исполнительного органа прямой геликоидной формы.

4 ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НОЖЕВЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ГЕОХОДА, ВКЛЮЧАЯ КОНСТРУКТИВНЫЕ, СИЛОВЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Для решения поставленной задачи необходимо:

- разработать конструкторско-технологические решения по созданию основных элементов ножевых исполнительных органов геохода, учитывая требования к конструкции;
- определить влияние конструктивных решений ножевых исполнительных органов геохода на технологические и силовые параметры взаимодействия его с породой;
- обосновать оптимальную форму ножа, используя топологическую оптимизацию с учетом особенностей работы геохода и его условий эксплуатации.

4.1 Определение конструктивных параметров НИО геохода при формировании геликоидной формы основных элементов

Определение конструктивных параметров НИО геохода включает в себя анализ различных аспектов, таких как геометрические размеры, форма и угол закручивания поперечного сечения ножей, а также выбор материала, из которого они будут созданы. Эти параметры должны обеспечивать необходимую эффективность резания, долговечность и надежность работы в условиях эксплуатации, связанных с различными свойствами породой забоя и адаптацией к изменениям в процессе работы. Главное требование, которое необходимо учитывать при проектировании основных элементов НИО геохода, заключается в закручивании поперечного сечения относительно определенной точки для всех элементов, входящих в поперечное сечение НИО.

В соответствии с нормативными документами минимальный диаметр туннелей составляет 2,4 метра, а максимальный может варьироваться в зависимости от проекта и условий, часто достигая 10 метров и более [66]. Для

подземных сооружений городской коммуникации, таких как трубопроводы и каналы, в основном формируются подземные пространства диаметром от 1 до 3,6 метра [67]. В связи с этим в работе рассматривается исследование параметров геогодов с радиусом от 0,5 до 3,0 метров.

Параметры поперечного сечения НИО, согласно п. 2.2 и п. 2.3, для всех форм принимаются одинаковые. Согласно формуле (1.1), были рассчитаны углы закручивания поперечного сечения НИО для геогодов β с радиусом от 0,5 до 1,2 метров, а также для геогодов с радиусом от 1,5 до 3,0 метров. Основные параметры при проектировании НИО геогода, которые рассматриваются в данной работе, таковы:

r_z – радиус геогода, мм;

β – угол закручивания поперечного сечения НИО геогода, мм;

B – ширина отвала НИО геогода, мм;

S – толщина отвала НИО геогода мм;

$r_{кр}$ – радиус кривизны окружности, образующей изогнутую часть НИО геогода, мм;

φ_{max} – центральный угол образующего профиль ножа, в градусах;

h_c – высота сегмента, образующего радиус кривизны окружности изогнутой части НИО геогода, мм;

h_z – длина сегмента окружности изогнутой части НИО геогода, мм;

γ_z – угол между высотой и длиной сегмента окружности изогнутой части НИО геогода, в градусах;

l_1 – длина прямого участка отвала НИО геогода, мм;

l_2 – длина дуги окружности, образующей изогнутую часть НИО геогода, мм.

Для определения конструктивных параметров рассматривается схема формообразования НИО геогода полувыпуклой и выпуклой формы, которая приведена на рисунке 4.1.

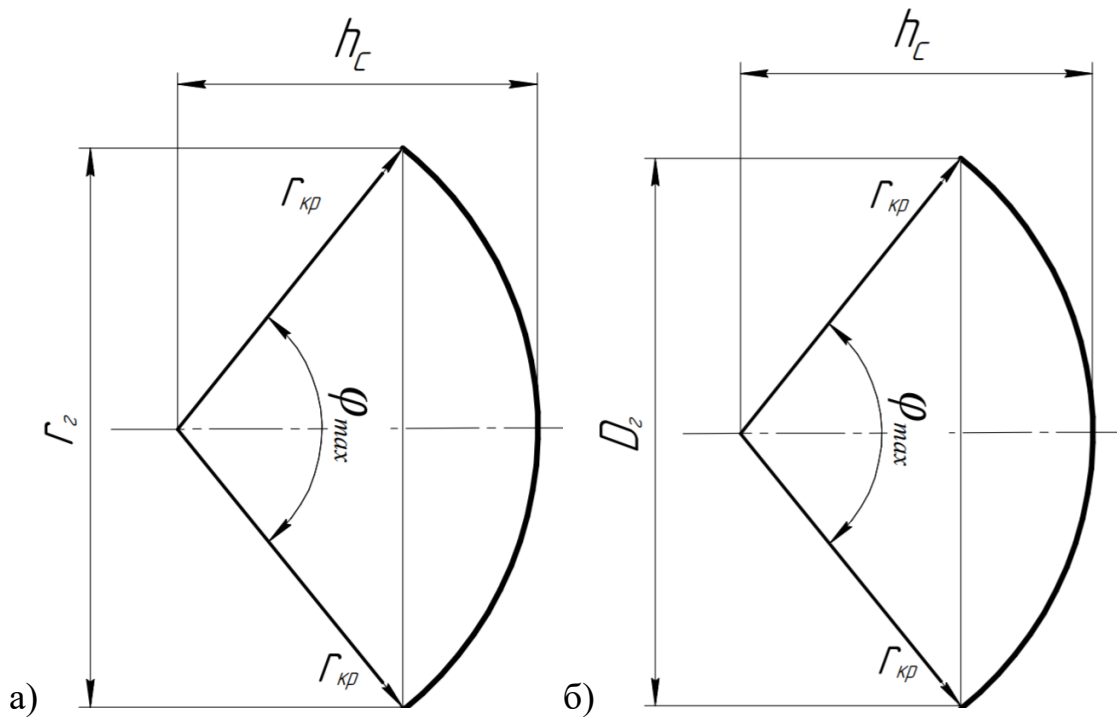


Рисунок 4.1 – Схема формообразования полувыпуклой формы (а) и выпуклой формы (б)

Для определения радиуса кривизны образующей окружности выпуклой геликоидной формы отвала НИО геохода необходимо использовать формулы:

$$h_c = r_{кр} - \sqrt{r_{кр}^2 - \frac{r_z^2}{4}} \quad (4.1)$$

Исходя из данной формулы следует отметить:

$$r_{кр}^2 - \frac{r_z^2}{4} \geq 0 \quad (4.2)$$

Таким образом, при определении параметров отвала выпуклой геликоидной формы НИО органа необходимо учесть:

$$r_{кр} \geq \frac{r_z}{2} \quad (4.3)$$

Для определения радиуса кривизны образующей окружности полувыпуклой геликоидной формы отвала НИО геохода необходимо использовать формулы:

$$h_c = r_{кр} - \sqrt{r_{кр}^2 - r_z^2} \quad (4.4)$$

Исходя из данной формулы следует отметить:

$$r_{кр}^2 - r_z^2 \geq 0 \quad (4.5)$$

При определении параметров отвала полувыпуклой геликоидной формы НИО органа необходимо учесть:

$$r_{кр} \geq r_z. \quad (4.6)$$

Параметры отвала НИО полувыпуклой и выпуклой формы указаны на рисунке 4.2.

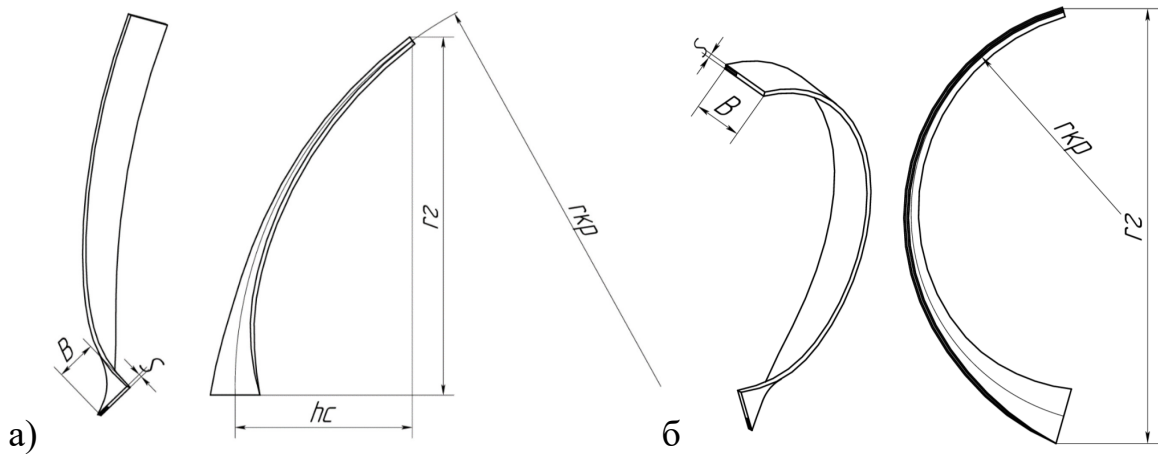


Рисунок 4.2 – Отвал НИО полувыпуклой геликоидной формы (а)
и выпуклой геликоидной формы (б)

Длина отвала НИО геохода полувыпуклой геликоидной формы и выпуклой геликоидной формы равна:

$$l = \frac{\pi r_{кр}}{180^\circ} \varphi_{\max}. \quad (4.7)$$

Для определения конструктивных параметров рассматривается схема формообразования НИО геохода геликоидной формы с воронкой, которая приведена на рисунке 4.3.

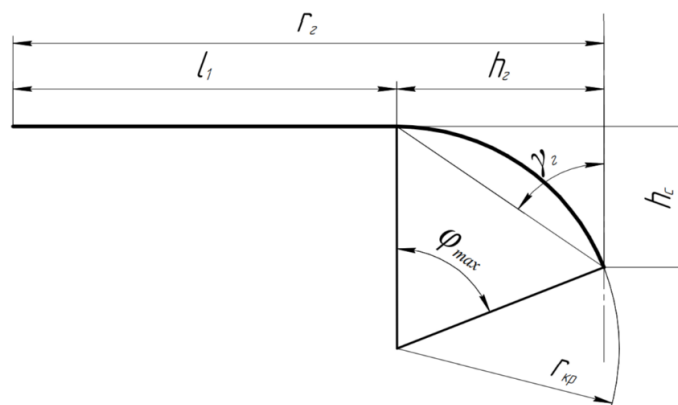


Рисунок 4.3 – Схема формообразования НИО геохода геликоидной
формы с воронкой

Для определения радиуса кривизны окружности, образующей изогнутую часть НИО геохода геликоидной формы с воронкой, необходимо использовать формулы:

$$r_{кр} = \frac{h_z}{2 \sin \frac{\varphi_{\max}}{2} \cdot \sin \gamma_z}. \quad (4.8)$$

Так как исходя из образовавшегося треугольника $\gamma_z = 90 - \frac{\varphi_{\max}}{2}$, то формула (4.8) будет равна:

$$r_{кр} = \frac{h_z}{\sin \varphi_{\max}}. \quad (4.9)$$

Параметры отвала НИО прямой геликоидной формы и геликоидной формы с воронкой указаны на рисунке 4.4.

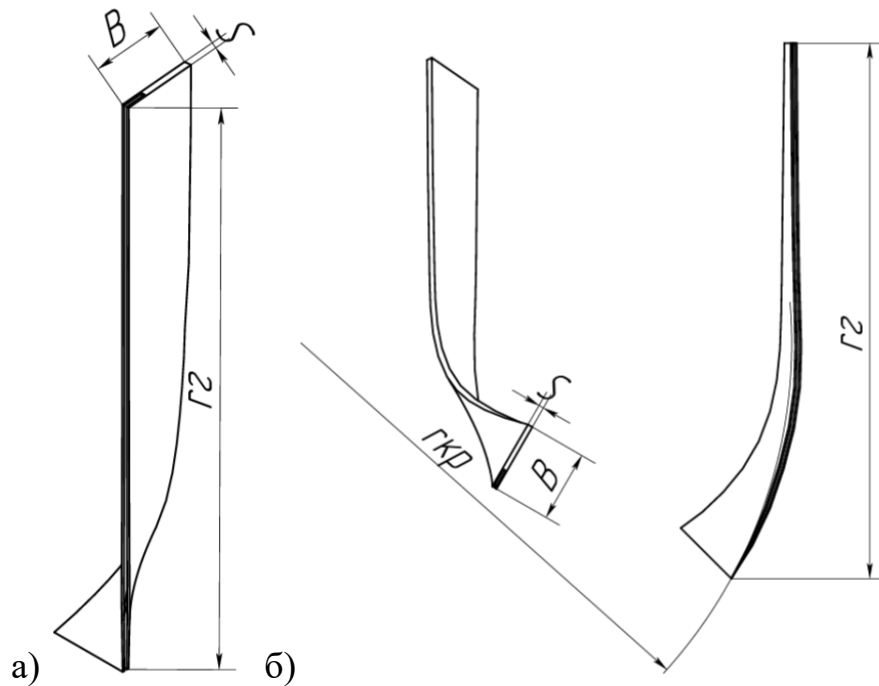


Рисунок 4.4 – Отвал НИО прямой геликоидной формы (а)
и геликоидной формы с воронкой (б)

Длина отвала НИО геохода геликоидной формы с воронкой равна:

$$l = l_1 + \frac{\pi r_{кр}}{180^\circ} \varphi_{\max} \quad (4.10)$$

Используя формулы (4.2), (4.3), (4.4), (4.7) и (4.10), учитывая ограничения (4.6) и (4.9), определены значения конструктивных параметров для оценки технологических параметров НИО геохода (таблица 4.1). При определении значения конструктивных параметров отвала НИО геохода геликоидной формы были приняты несколько допущений: $\varphi_{\max} = 45^\circ$; $h_2 = 0,4r_2$.

Таблица 4.1 – Значения конструктивных параметров для оценки технологических параметров НИО геохода

r_2 , мм	B , мм	S , мм	Полувыпуклая форма			Геликоидная с воронкой			Выпуклая форма		
			$r_{кр}$, мм	h_c , мм	L , мм	$r_{кр}$, мм	h_2 , мм	L , мм	$r_{кр}$, мм	h_c , мм	L , мм
500	150	20	625	250	579,5584	282,8427	200	522,1441	259,8506	200	672,8041
750	150	20	937,5	375	869,3376	424,2641	300	783,2162	389,7759	250	1009,206
1000	200	20	1250	500	1159,117	565,6854	400	1044,288	519,7012	250	1345,608
1250	200	20	1562,5	625	1448,896	707,1068	500	1305,36	650	300	1682,977
1500	250	20	1875	750	1738,675	848,5281	600	1566,432	779,55	350	2018,408
1750	300	20	2187,5	875	2028,454	989,9495	700	1827,505	909,477	400	2354,814
2000	300	20	2500	1000	2318,234	1131,371	800	2088,577	1039,402	450	2691,216
2250	350	30	2812,5	1125	2608,013	1272,792	900	2349,649	1169,328	500	3027,618
2500	350	30	3125	1250	2897,792	1414,214	1000	2610,721	1299,253	550	3364,02
2750	400	30	3437,5	1375	3187,571	1555,635	1100	2871,793	1429,178	600	3700,422
3000	400	30	3750	1500	3477,35	1697,056	1200	3132,865	1559,103	650	4036,824

По формуле (1.1) была также определена зависимость шага от радиуса геохода при различных значениях угла закручивания поперечного сечения НИО. Зависимость (рисунок 4.5) показывает, что на шаг внешнего движителя геохода влияет ни только радиус геохода, но и угол закручивания поперечного сечения НИО.

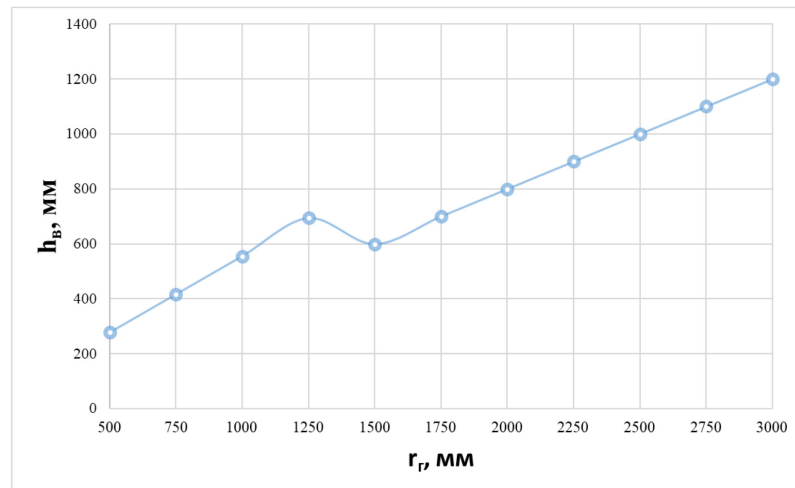


Рисунок 4.5 – Зависимость шага внешнего движителя от радиуса геохода при различных значениях угла закручивания поперечного сечения НИО

Также получена по данным параметрам зависимость радиуса кривизны окружности, образующей изогнутую часть НИО, от радиуса геохода. Зависимость (рисунок 4.6) показывает, что радиус геохода прямо пропорционален радиусу кривизны окружности, образующей изогнутую часть НИО.

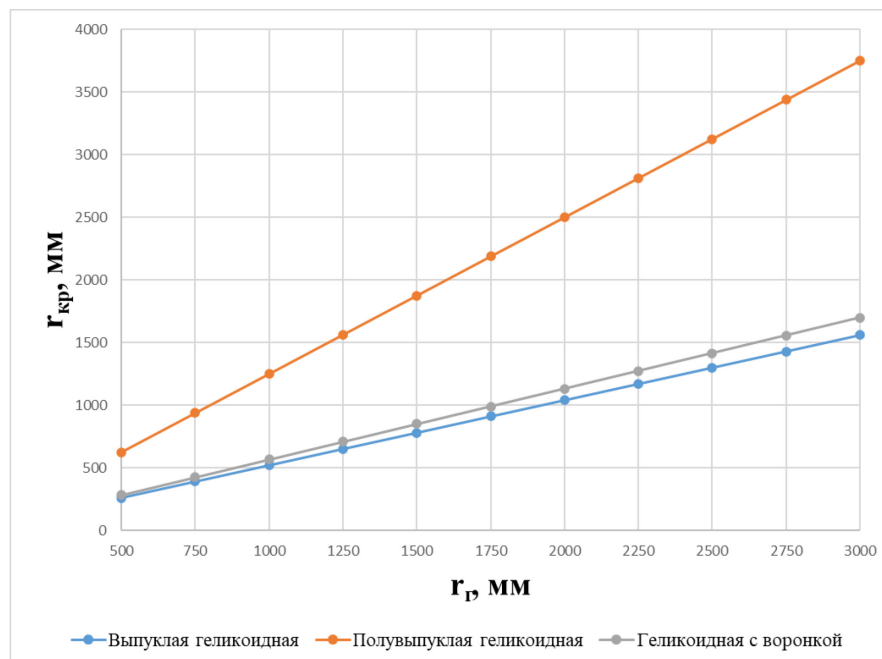


Рисунок 4.6 – Зависимость радиуса геохода от радиуса кривизны окружности, образующей изогнутую часть НИО при разных формах отвала

Таким образом, определены конструктивные параметры НИО геохода, которые будут использоваться при разработке конструкторско-технологических

решений по созданию основных элементов НИО и при определении других силовых и технологических параметров конструкции.

4.2 Обоснование выбора материалов для создания основных элементов ножевых исполнительных органов геохода, учитывая особенности его работы и эксплуатации

Анализ источников [68-71] показывает, что при выборе материала необходимо в первую очередь учитывать прочность материала и характер работы НИО проходческого агрегата. При работе НИО возникают постоянные и переменные динамические нагрузки, поэтому нужен материал достаточно прочный, твердый и износостойкий. На рисунке 4.7 приведены основные критерии для выбора материала, которые охватывают все факторы для выбора и обоснования материала.



Рисунок 4.7 – Основные критерии для выбора материала

Одним критерием для обоснования выбора материала являются его технологические свойства. К технологическим требованиям материалов относятся: хорошая обрабатываемость резанием и давлением, хорошая свариваемость, способность к литью. Технологические свойства зависят от химического состава материала и выбора режимов предварительной термической обработки.

Требования к материалам ножа ИО геохода следует сформулировать исходя из конструктивных решений, функциональных возможностей, условий работы агрегата и технологических возможностей при создании основных элементов.

Основными требованиями к материалам для создания основных элементов НИО геохода являются:

- высокие механические характеристики, такие как прочность, твердость, ударная вязкость;
- высокая износостойкость;
- высокая теплостойкость, т. е. сохранение своих механических свойств при высоких температурах;
- высокая теплопроводность и малочувствительность к циклическим колебаниям температуры, так как при разрушении породы может изменяться температура;
- высокая технологичность для обеспечения производства создания ножей с требуемой точностью и качеством при минимальных затратах.

Заготовки для основных элементов НИО геохода при термической обработке должны иметь более простую геометрическую форму без острых граней.

Как было уже отмечено, режущая кромка ножа и отвала ИО работают в особо тяжелых условиях, поэтому для данного типа конструкции рекомендуются такие материалы, как легированные стали с высокой износостойкостью. Для таких отвалов целесообразно применять в качестве термической обработки закалку, а для режущих кромок наплавку.

Для правильного выбора материала отвала и ножа необходимо учесть ряд факторов: физико-механические свойства пород; характер нагрузки во время работы и эксплуатации проходческого агрегата с НИО; технологические особенности конструкции ножей; производственные возможности и экономические показатели.

НИО с геликоидными поверхностями предназначен для разрушения мягких горных пород, коэффициент крепости по шкале М.М. Протодяконова для таких пород составляет $f=1$. Степень крепости измеряется через коэффициент, который в первом приближении пропорционален пределу прочности породы при сжатии [9-10].

НИО геохода работают в тяжелых нагруженных условиях, возникают динамические нагрузки, абразивное изнашивание рабочих поверхностей, затупление режущих кромок. Выбор материала также будет зависеть от видов нагрузки, которые возникают при разрушения горной массы. От механических воздействий при работе НИО происходит затупление основной и боковой режущих кромок. При непрерывном разрушении горной массы появляются так называемые пустоты, из-за этого возникают резкие удары, также небольшие сколы вследствие наличия инородных тел.

Учитывая все возникающие нагрузки, на основе приведенных исследований [9, 10, 72, 73] для разрушения пород малой крепости целесообразно применять ИО с ножевыми элементами разрушения, как те, что были разработаны в п.2.3. Таким образом, в зависимости от вида нагрузки, конструктивных решений, технологичности конструкции применяется различные легированные сплавы с высокой износостойкостью [74-79], которые приведены в таблице 4.2, учитывая все вышеперечисленные требования.

Таблица 4.2 – Основные рекомендуемые материалы для НИО геохода

Порода	Вид нагрузки	Конструкции	Технологии	Рекомендуемые материалы
Мягкие породы	динамические нагрузки, абразивное изнашивание рабочих поверхностей, затупление режущих кромок	Цельная, сборная	Литейная	35ХГСЛ, 35Л, 45Л, 110Г13Л
			Прокатная	45, 40Х, 45ХН, 18Х2Н4ВА, 30ХГСА, 09Г2С
			Штамповка	18Х2Н4ВА, 30ХГСА, 09Г2С
			Аддитивные технологии	дисперсионно-твердеющие стали, никелевый и кобальтовый сплав

Для получения заготовки основных элементов НИО геохода методом литья необходимо выбрать из приведенных в таблице 4.2 материалов наиболее рациональные. Выбор производится по следующим критериям: механические, литейные и технологические свойства и доступность материалов.

При анализе прочностных характеристик материалов для заготовки основных элементов ИО следует отметить, что сталь 35ХГСЛ обеспечивает наивысшую прочность среди рассмотренных вариантов. На основании сравнительных данных

по ударной вязкости литейных сталей следует сделать вывод, что рациональным вариантом является легированная сталь 35ХГСЛ.

Для анализа характеристик пластичности литейных сталей учитываются такие параметры, как относительное удлинение при разрыве и сужение. Из сравнительных данных видно, что сталь 110Г13Л обладает наибольшей пластичностью. Однако, если рассмотреть прочностные характеристики материалов для заготовки основанных элементов ИО, то следует отметить, что сталь 35ХГСЛ демонстрирует более высокую прочность по сравнению с другими исследуемыми материалами, такими как 35ХГСЛ, 35Л, 45Л и 110Г13Л.

Одним из важных параметров материалов для разрушения горной массы является твердость материала, из которого будут изготавливаться инструменты, т.е. для мягких пород – выше 200 МПа. В таблице 4.3 приведены основные механические свойства литейных сталей для основных элементов ИО геохода.

Таблица 4.3 – Основные механические свойства литейных сталей

Литейные стали	Сортамент	НВ, МПа	Свариваемость
45Л	Отливки	143–241	Трудносвариваемая
35Л		137–229	Ограниченная, подогрев + термообработка
35ХГСЛ		163–240	Ограниченная, подогрев + термообработка
110Г13Л		186–229	Трудносвариваемая

Из таблицы 4.3 видно, что среди представленных литейных сталей 35ХГСЛ обладает наиболее подходящими механическими свойствами, при этом обеспечивая необходимую твердость для работы с мягкими породами, поскольку ее значение НВ составляет 163-240 МПа. Несмотря на ограниченную свариваемость и необходимость в подогреве и термообработке, ее прочностные характеристики делают этот материал предпочтительным для создания инструментов в геоходах.

Для литейных сталей также важны литейные свойства, которые необходимо учитывать при выборе материалов. Основные литейные свойства литейных сталей приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Основные литейные свойства литейных сталей

Материал	Линейная усадка при литье	Температура начала затвердевания материала	Жидкотекучесть	Показатель трещиностойкости	Склонность к образованию усадочной раковины	Склонность к образованию усадочной пористости
	%	°C	К _{ж.т.}	К _{т.у.}	К _{у.р.}	К _{у.п.}
35Л	2,2–2,3	1480–1490	1,0	0,8	1,2	1,0
45Л	2,2–2,3	1480–1490	1,0	0,8	1,2	1,0
35ХГСЛ	2,2–2,3	1486–1495	0,9	0,7	1,1	1,0
110Г13Л	2,6–2,7	1350–1370	0,8	0,4	1,7	2,5

Анализ литейных свойств показывает, что сталь 35ХГСЛ обладает наилучшими характеристиками для отливки, так как ее показатели линейной усадки, температуры начала затвердевания и жидкотекучести делают ее наиболее предпочтительной среди рассмотренных материалов. Кроме того, сталь 35ХГСЛ имеет хорошую трещиностойкость и относительно низкую склонность к образованию усадочной пористости, что также является важным фактором для обеспечения качества отливки основных элементов НИО.

Для обеспечения необходимой точности и качества рабочих поверхностей ножей и отвалов ИО геохода после отливки требуется механическая обработка этих поверхностей. При выборе материалов рассматриваются технологические свойства литейных материалов, в частности коэффициент обрабатываемости резанием. В таблице 4.5 приведены технологические свойства различных материалов, включая их обрабатываемость резанием.

Таблица 4.5 – Технологические свойства рекомендуемых материалов

Материал	Исходные данные			Обрабатываемость резанием К _и	
	Состояние	НВ, МПа	σ _в , МПа	твердый сплав	быстрорежущая сталь
45Л	нормализованное отпущенное	200	540	1,0	0,7
35Л	нормализованное и отпущенное	160	470	1,2	0,9
35ХГСЛ	отожженное	174–283	520	0,9	0,7
110Г13Л		229		0,25	

На основании представленных данных в таблице 2.23 следует отметить, что среди рассматриваемых материалов наиболее эффективными в плане обрабатываемости являются 35Л и 35ХГСЛ, которые обеспечивают высокие значения коэффициента обрабатываемости как для твердых сплавов, так и для

быстрорежущей стали. Легированная сталь 35ХГСЛ является материалом с повышенной износостойкостью, хорошо обрабатывается резанием и сваривается.

Для получения заготовки основных элементов НИО геохода обработки металлов давлением необходимо выбрать из приведенных в таблице 2.18 материалов наиболее рациональные. Выбор производится по следующим критериям: механические и технологические свойства и доступность материалов.

Механические свойства зависят от сортамента, режима термообработки и других факторов. В табл. 4.6 приведены основные механические свойства материалов для технологических методов обработки давлением тела ножа.

Таблица 4.6 – Основные механические свойства материалов для технологических методов обработки давлением

Марка стали	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности, σ_b , МПа	Предел выносливости, σ_{-1} , МПа	Относительное удлинение при разрыве δ , %	Твердость, НВ	Ударная вязкость, кДж / м ²
45	355	600	245	16	170–179	660
45ХН	810	1010	506	10	207	690
40Х	785	980	509	9	217	400-850
18Х2Н4ВА	215	570	540	12	269	882
30ХГСА	820	980	490	11	229	127
09Г2С	155-255	490	235	21	450-490	590
15Х	195	390	304	19	217	590
18ХГТ	885	700	637	15	217	720
12Х2Н4А	930	1130	519-676	10	269	880
10ХСНД	390	510-685	167-284	19	290	290
18Х2Н4МА	835	1130	540	12	269	980
18ХГНМФР	950	1050	540	18	360	950

На основании анализа механических свойств различных материалов, приведенных в таблице 2.24, выделяются следующие предпочтительные стали для заготовки основных элементов НИО геохода, обрабатываемых методом давления.

Наивысшие значения предела текучести и предела прочности демонстрируют стали 45ХН ($\sigma_{0,2} = 810$ МПа, $\sigma_b = 1010$ МПа) и 12Х2Н4А ($\sigma_{0,2} = 930$ МПа, $\sigma_b = 1130$ МПа). Эти марки обеспечивают необходимую прочность для работы в условиях высоких нагрузок.

Стали с более высоким относительным удлинением, такие как 09Г2С ($\delta = 21\%$) и 15Х ($\delta = 19\%$), показывают лучшую пластичность, что важно для

предотвращения хрупких разрушений при динамических нагрузках. Однако стоит отметить, что такие стали имеют более низкие прочностные характеристики по сравнению с другими марками.

Ударная вязкость является критически важным параметром для материалов, подверженных ударным нагрузкам. Наивысшие показатели ударной вязкости наблюдаются у сталей 18Х2Н4МА (980 кДж/м²) и 18ХГНМФР (950 кДж/м²), что делает их предпочтительными для условий эксплуатации, где возможны резкие изменения нагрузки.

Для заготовки основных элементов НИО геохода целесообразно рассмотреть марки сталей 12Х2Н4А и 18Х2Н4МА. Эти материалы обеспечивают оптимальное сочетание прочностных характеристик, относительного удлинения и ударной вязкости, что делает их наиболее рациональными для применения в условиях, характерных для работы геохода, основываясь на специфике эксплуатации и ожидаемых нагрузках на элементы конструкции.

Технологические свойства материалов приведены в таблице 4.7, они позволяют оценить возможности их обработки различными технологиями при создании НИО геохода.

Таблица 4.7 – Технологические свойства материалов для ножа и отвала

Материалы	Технологические данные как критерии для выбора материала			
	Обработка давлением	Обрабатываемость резанием	Свариваемость материала	Температурные интервалы работы
18Х2Н4МА	Хорошо деформируется в горячем состоянии. Интервал деформации 1180-850 °С.	Сталь труднообрабатываемая: – коэффициент обрабатываемости резанием твердым сплавом – 0,72; – коэффициент обрабатываемости резанием быстрорежущей стали – 0,63.	Трудносвариваемая, необходимы подогрев и последующая термообработка	-70 +450 °С
12Х2Н4А	Хорошо деформируется в горячем состоянии. Интервал деформации 1180-850 °С.	Обрабатывается резанием удовлетворительно: – коэффициент обрабатываемости резанием твердым сплавом – 0,96; – коэффициент обрабатываемости резанием быстрорежущей стали – 1,26.	Сварка с ограничениями, необходимы подогрев и последующая термообработка.	
09Г2С	Хорошо деформируется в горячем состоянии. Интервал деформации 1250-850 °С	Обрабатывается хорошо: – коэффициент обрабатываемости резанием твердым сплавом – 1,6; – коэффициент обрабатываемости резанием быстрорежущей стали – 1,0	Сваривается без ограничений	-70 +425°С

На основании анализа технологических свойств материалов, приведенных в таблице 4.7, следует сделать следующие выводы о выборе материалов для заготовки ножа и отвала НИО геохода.

Все рассматриваемые стали (18Х2Н4МА, 12Х2Н4А и 09Г2С) демонстрируют хорошие показатели деформируемости в горячем состоянии, что позволяет эффективно использовать их в процессах обработки давлением. Температурные интервалы для деформации находятся в пределах 1180-850 °С для первых двух марок и 1250-850 °С для 09Г2С, что также свидетельствует о высокой технологичности этих материалов.

Сталь 09Г2С обладает наилучшей обрабатываемостью резанием, с коэффициентами 1,6 для твердых сплавов и 1,0 для быстрорежущей стали. Это делает ее предпочтительной для механической обработки. Сталь 12Х2Н4А также

имеет удовлетворительные показатели обрабатываемости, что делает ее приемлемым выбором. В то же время сталь 18X2H4MA является труднообрабатываемой, что может усложнить процесс производства. Стали 12X2H4A и 18X2H4MA имеют ограничения по сварке и требуют подогрева и последующей термообработки, что увеличивает сложность их использования в сварочных работах.

Учитывая все приведенные критерии, а именно основные механические свойства материалов для технологии обработки давлением, твердость материалов, ударная вязкость, параметры пластичности, технологические данные, сравниваются для создания отвала и ножа ИО геолода легированные стали 18X2H4MA и 12X2H4A. Сталь 12X2H4A является склонной к отпускной хрупкости по сравнению с 18X2H4M, поэтому при термообработке необходимо ускоренное охлаждение после отпуска в воде, что для крупногабаритных деталей не всегда эффективно. Данные материалы также имеют высокую износостойкость и вязкость. По прочностным характеристикам данные материалы соответствуют требованиям.

Таким образом, для основных элементов НИО предпочтительнее выбрать сталь 18X2H4MA, которая выдерживает большие непрерывные нагрузки, учитывая условия эксплуатации геолода. Так как затраты на создание основных элементов НИО значительно меньше, чем затраты на замену ножей при эксплуатации оборудования в реальных условиях работы агрегата. Для обеспечения высокой точности и качества при обработке сложных криволинейных поверхностей ножа и отвала ИО будет применяться высокопроизводительное металлообрабатывающее оборудование с современными инструментами.

4.3 Разработка конструкторско-технологических решений по созданию основных элементов НИО геолода, учитывая требования к конструкции

В качестве альтернативных технологий создания основных элементов ИО геолода авторы [80] рассматривают метод холодной штамповки и прокат с

дальнейшей механической обработкой. Обзор технологии создания различных рабочих инструментов для разрушения мягкой породы показывает [33-36], что при серийном производстве таких деталей целесообразно применять литье для получения заготовки. Также подобные детали, такие как отвал плуга, воздушный винт (лопастной двигатель), импеллер и шнекоцентробежные колеса, винтовые геликоидальные шнеки, винтовые поверхности гидротрубины, отвалы бульдозеров и т. д. в основном получают методом литья. На практике применяются методы обработки давлением, такие как холодная и горячая штамповка, ковка, прокат и т. д.

Согласно анализу конструкторско-технологических решений по созданию ИО горнопроходческих систем для разрушения мягкой породы, в п. 1.3 в качестве альтернативных вариантов способа получения заготовки основных элементов ИО геохода рассматриваются литье, штамповка, прокат и аддитивные технологии.

Для определения рационального варианта способа литья проанализированы основные технологические возможности способов литья. Изучая технологические возможности способов литья, рассматриваются особенности применения и рекомендации к применению (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Рекомендации по выбору способа литья

Способы литья	Особенности применения	Рекомендации к применению
Литье в земляные формы	Формовочные смеси	Рекомендуется применять для получения заготовки тела ножа, необходима механическая доработка для обеспечения требуемой точности и качества детали
Литье в оболочковые формы	Форма является разовой	Рекомендуется применять для получения заготовки тела ножа с учетом ограничений, максимальный диаметр геохода 3 м, минимальная партия деталей ножа 200 шт.
Литье по выплавляемым моделям	При больших партиях является экономически выгодным	Рекомендуется применять для получения заготовки тела ножа с учетом ограничений, максимальный диаметр геохода 2 м, минимальная партия деталей ножа 1000 шт.
Литье в металлические формы (кокиль)	При больших партиях является экономически выгодным, требуются большие затраты на изготовление формы	Не рекомендуется
Литье металлов под давлением	В основном используется для фасонных отливок и является экономичным способом при больших партиях	Не рекомендуется
Центробежное литье (ротокастинг)	Используется для получения отливок тела вращения (кольца, диски, втулки)	Не рекомендуется

Исходя из рекомендаций по выбору литья и учитывая, что производство НИО относится к мелкосерийным, следует рассматривать возможности получения геликоидной формы отвала ИО геохода в качестве альтернативных вариантов литья в земляных и оболочковых формах. Выбор способа литья обосновывается расчетом припусков и себестоимости заготовки при использовании земляных и оболочковых форм. Для определения припусков заготовки были рассчитаны все размеры, формирующие тело заготовки [41]. Размеры сечения для всех форм принимаются одинаковыми.

Класс размерной точности зависит от габаритов отвала ИО, в то время как степень коробления определяется отношением наименьшего размера элемента отливок к наибольшему. При этом степень точности поверхности и класс точности массы зависят от массы отливок, которую в данном случае принимаем за основу. Основные технологические параметры литья для получения заготовки отвала НИО приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Основные технологические параметры литья для получения заготовки отвала НИО геохода

r_z , мм	лить в земляные формы			лить в оболочковой форме		
	класс размерной точности	степень коробления	степень точности поверхности	класс размерной точности	степень коробления	степень точности поверхности
500	11	8	16	12	8	12
750		9	18		9	
1000	12	10		13	10	13
1250						14
1500						
1750			13	11		14
2000	16					
2250						
2500						
2750						
3000						

Для определения массы заготовки отвала назначены припуски на механическую обработку в зависимости от способа литья. Эти припуски были определены на основе основных технологических параметров литья, что позволило получить заготовку отвала. Масса заготовки рассчитывалась для каждого типоразмера, учитывая различные параметры форм отвала ИО геохода. Для этого

была разработана 3D-модель заготовки в среде моделирования SolidWorks, в результате чего были получены массы этих заготовок.

Одним из традиционных подходов для получения заготовок является применение методов обработки металлов давлением. В частности, для получения заготовки тела ножа следует рассмотреть несколько технологий, включая прокат, ковку, холодную и горячую штамповку. Каждая из этих технологий обладает своими преимуществами и недостатками, которые определяют их целесообразность в зависимости от конкретных требований к заготовке.

Прокат позволяет получить детали с высокой прочностью и однородной структурой, что особенно важно для элементов, подвергающихся значительным механическим нагрузкам. Ковка, в свою очередь, способствует улучшению механических свойств материала за счет уплотнения структуры, что делает ее хорошим выбором для деталей, требующих высокой надежности. Холодная штамповка обеспечивает экономический эффект при массовом производстве за счет снижения затрат на нагрев материала, однако может требовать более точного контроля за свойствами материала. Горячая штамповка, хотя и увеличивает затраты из-за необходимости предварительного нагрева, позволяет достичь высокой точности размеров и формы заготовки, что может быть критичным для дальнейшей обработки.

Выбор конкретной технологии обработки давлением основывается на анализе требования к прочности, точности и экономической эффективности производства. Обоснование выбора технологии обработки давлением представлено в п. 1.3. Исходя из рекомендаций по выбору методов обработки давлением и учитывая особенности конструкции ножа ИО, тип производства, в качестве альтернативных вариантов следует рассматривать возможности получения геликоидной формы отвала ИО геолода заготовкой прокат и холодной объемной штамповкой с последующей механической обработкой.

Обзор конструкторско-технологических решений по получению заготовки обработки давлением [81-84] показал (п. 1.3), что в качестве целесообразного варианта можно рассматривать гибку. Для оценки обосновании выбора данного

метода необходимо: определить размеры заготовки с учетом припусков на механическую обработку; определить усилия для гибки исходного материала; выбрать оборудование; рассмотреть возможности проектирования гибочного штампа, определить плоскость разреза; выполнить расчет коэффициента использования материала; определить технологическую стоимость ножа при применении данного метода.

В качестве исходного сырья для гибки принимаем прокат сортовой стальной горячекатаной полосой. Согласно нормативным документам, масса поковки определяется:

$$m_3 = m_d \cdot K_p, \quad (4.11)$$

где $K_p = 1,5$ – расчетный коэффициент.

Основные технологические параметры поковки приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Основные технологические параметры поковки

Параметры поковки	Геликоидные формы ножа ИО геохода		
	Прямой	Выпуклый	С воронкой
Класс точности	М1		
Группа стали	Т4		
Степень сложности	С3	С4	С4
Конфигурация штампа	П	И _с	И _с
Штамповочные уклоны, в градусах	5		
Радиус закругления, мм	3		
Допустимая величина остаточного слоя, мм	2		
Допустимое смещение поверхности штампа, мм	1,2		
Допустимая величина заусенца, мм	10		

Исходный индекс, используемый в качестве показателя качества поковки, подразумевает целый ряд определяющих факторов, связанных с классом точности, группами стали и степенью сложности использованной конфигурации штампа. В зависимости от назначения и технологий, применяемых для получения поковок, таких как штамповка и упаковка, устанавливаются допустимые величины смещения и другие условия.

В соответствии с таблицей 4.11, основные технологические параметры поковки, включая геликоидные формы ножа ИО геохода, имеют следующие значения.

Таблица 4.11 – Исходный индекс поволоков для отвалов ННО для последующего назначения основных припусков

r_0 , мм	Прямая геликоидная	Выпуклая геликоидная	Полувывпуклая геликоидная	Геликоидная с воронкой	
500	15	16	15	16	
750	16	17	16	17	
1000					
1250					
1500	17	18	17	18	
1750					
2000			19		
2250					
2500	18	19			
2750					
3000					

Для заготовки прямого геликоида длина полосы с учетом припусков на обработку будет равна:

$$L = l_1 + 2Z_{\text{общ}}, \quad (4.12)$$

где $Z_{\text{общ}}$ – общий припуск на механическую обработку.

Для заготовки формы выпуклого геликоида длина полосы с учетом величины изгиба будет равна:

$$L = 0,01745\varphi_r \cdot (r + x \cdot S), \quad (4.13)$$

где φ_r – угол изогнутого участка, r – радиус гибки, S – толщина материала, мм.

Для заготовки геликоида с воронкой длина полосы будет:

$$L = l_1 + l_2 + 2l_n, \quad (4.14)$$

где l_n – длина нейтрального слоя изогнутого участка.

Для обоснования выбора гибочной установки необходимо определить усилия при гибке. Для схемы гибки выбирается двухугловая гибка с прижимом калибровкой, при этом усилие рассчитывается по следующей формуле:

$$P = (3 \div 4) \cdot B \cdot S \cdot \delta_b \cdot k_2, \quad (4.15)$$

где B – ширина полосы, мм; δ_b – предел прочности, МПа; k_2 – коэффициент, учитывающий упрочнение металла при изгибе.

На рисунке 4.8 приведена схема гибки заготовки выпуклой геликоидной формы.

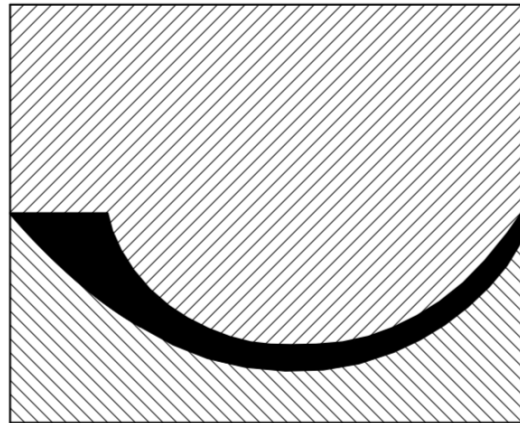


Рисунок 4.8 – Схема гибки заготовки выпуклой геликоидной формы

В качестве альтернативного варианта проводится оценка эффективности использования заготовки из проката с последующим механическим удалением слоя материала. Длина заготовки для проката с учетом припусков с двух сторон находится по формуле (4.12).

В качестве исходного сырья для формирования отвала прямой геликоидной и геликоидной с воронкой форм рассматривается листовой горячекатанный прокат прямоугольного сечения, согласно схеме, приведенной на рисунке 4.9.

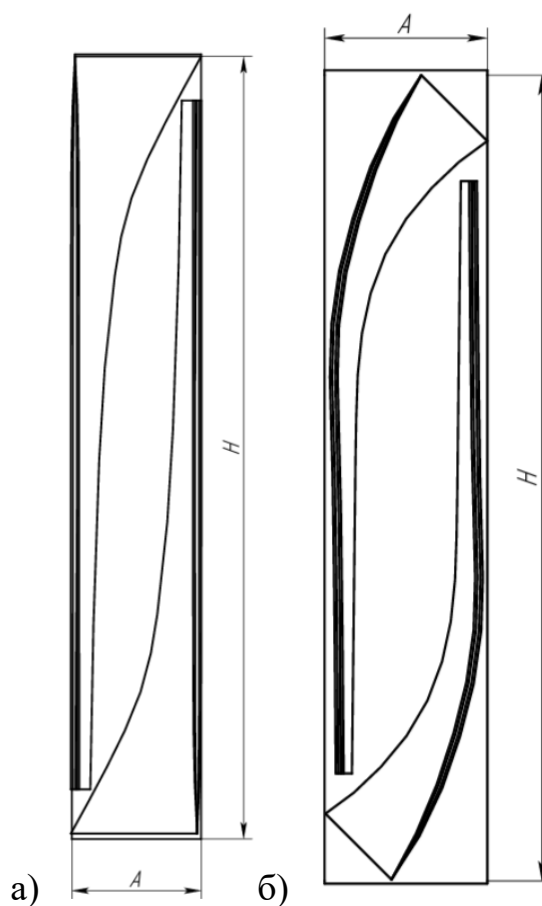


Рисунок 4.9 – Схема расположения заготовки для отвала НИО прямой (а) и геликоидной с воронкой формы (б)

Для отвалов выпуклой и полувыпуклой геликоидной формы с учетом механической обработки рассматривается схема расположения заготовок, приведенная на рисунке 4.10.

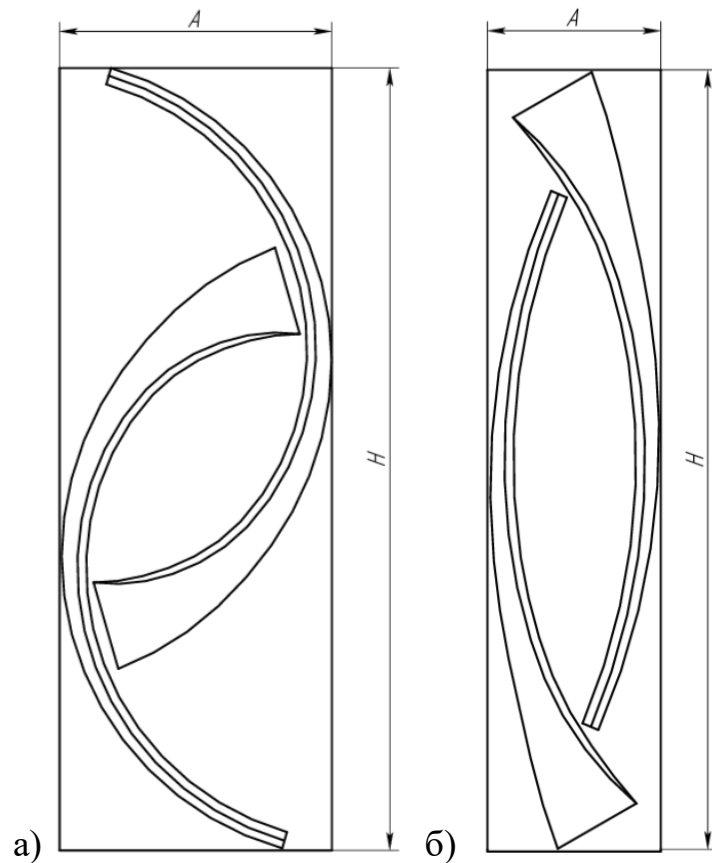


Рисунок 4.10 – Схема расположения заготовок для отвала выпуклой (а) и полувыпуклой (б) геликоидной формы

По данным схемам для разного типа размеров отвалов НИО геохода рассчитаны массы заготовки методом проката.

Аддитивный способ получения деталей позволяет изготавливать детали, такие как нож геликоидной формы со сложной геометрией, которые трудно получить с использованием традиционных методов обработки материалов. В таблице 4.12 приведены основные технологии аддитивных производств для металлических изделий и их особенности применения.

Таблица 4.12 – Особенности применения методов аддитивных технологий для создания основных элементов ИО геохода

Технологии аддитивного производства	Особенности применения	Возможности применения при создании НИО геохода
Селективное лазерное спекание (SLS)	- большой широкий выбор материалов; - минимальные затраты на постобработки; - низкая производительность из-за длительной работы лазера; - массовое и мелкосерийное изготовление продуктов с индивидуальными характеристиками; - надежность и прочность готовой продукции.	Не рекомендуется
Непрямое лазерное спекание металлов (IMLS)	- широкий спектр металлов; - благодаря использованию металлического порошка и лазера высокой мощности создаются объекты с высокой прочностью и долговечностью; - не требуются опорные структуры для создания сложных геометрических форм и это позволяет создавать объекты с внутренними полостями и сложными структурами; - обеспечивает высокую точность и детализацию при создании металлических объектов; - технология позволяет быстро создавать металлические объекты, так как лазер спекает металлический порошок по слоям; - технология позволяет использовать металлический порошок в больших количествах, что делает его экономически выгодным методом производства; - технология позволяет использовать различные металлические сплавы с разными свойствами, такими как прочность, термостойкость и теплопроводность, и это позволяет создавать объекты с оптимальными характеристиками для конкретных приложений.	Рекомендуется
Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	- доступен большой выбор металлов в т. ч. числе суперсплавы; - возможность реализации сложных геометрических форм; - сокращение сроков выполнения заказа благодаря отсутствию инструментов - обеспечивается высокая точность, применяется для деталей, которым требуются высокая прочность и стойкость к динамическим и статическим нагрузкам.	Рекомендуется
Селективное лазерное плавление (SLC)	- обеспечивает высокую плотность и прочность создаваемых объектов благодаря полному плавлению металла; - технология позволяет использовать различные металлические материалы, включая нержавеющую сталь, алюминий, титан и другие сплавы; - может потребоваться использование опорных структур для поддержки объекта во время процесса плавления и охлаждения; - обеспечивается высокая точность, применяется для деталей, которым требуются высокая прочность и стойкость к динамическим и статическим нагрузкам.	Рекомендуется

Приведенный обзор основных технологий аддитивного производства для металлических изделий показывает, что методы DMLS и SLC представляют собой альтернативные технологии аддитивного производства ножей ИО геохода. Данные методы обеспечивают высокую точность, детализацию и возможность создания ножей сложных геометрических форм. Обоснованием выбора аддитивных

способов получения ножа является исследование возможности применения технологии аддитивного производства при создании геликоидной формы ножа ИО геохода.

Для определения технологической себестоимости и параметров печати при применении аддитивных технологий методом СЛС используем специализированную платформу [85] для выполнения расчетов.

Для создания основных элементов НИО используются такие материалы, как дисперсионно-твердеющие стали, никелевый и кобальтовый сплав. В качестве альтернативных вариантов, как отмечается в работах [86-90], применяют инструментальную сталь AISI H13. Данный материал является высокоуглеродистым, хромомолибденовая инструментальная сталь обладает высокой твердостью, прочностью и устойчивостью к тепловому воздействию (таблица 4.13). Она часто используется для создания деталей, работающих при высоких температурах и требующих высокой износостойкости. AISI H13 также обладает хорошей способностью сохранять остроту режущего края и устойчивостью к трещинам при работе с твердыми материалами [91-94].

Таблица 4.13 – Механические свойства стали AISI H13

Свойства	Значение
Предел прочности при растяжении, предельный (при 20 °C / 68 °F, зависит от термообработки)	1200-1590 МПа
Прочность на растяжение, предел текучести (при 20 °C / 68 °F, зависит от термообработки)	1000-1380 МПа
Уменьшение площади (при 20 °C / 68° F)	50,00%
Модуль упругости (при 20 °C / 68 °F)	215 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,27-0,30

Процесс печати происходит путем нанесения слоя металлического порошка, который затем плавится лазером с высокой точностью, чтобы создать требуемую форму ножа. Настройка ориентации и расположения детали на платформе может влиять на качество поверхности, механические свойства и точность размеров изделия [94]. Оптимальное расположение ножа на платформе выбрано с учетом минимизации поддержек, равномерного распределения тепла на порошковый материал для правильного плавления с помощью лазера и обеспечения необходимой связки между частицами порошка в процессе печати и обеспечения необходимой прочности и качества детали.

Для обоснования способа получения заготовки рассматриваются преимущества и недостатки основных технологий. В таблице 4.14 приведены особенности применения технологии получения заготовки основных элементов НИО геохода в условиях мелкосерийного производства.

Таблица 4.14 – Особенности технологии получения заготовки

Технология	Преимущества	Недостатки
Литье в оболочковой форме	– высокой коэффициент использования материалов; – минимальные припуски для дальнейшей механической обработки сложных поверхностей основных элементов ИО; – формирование предварительного профиля режущей кромки ножа ИО геохода; – экономически целесообразно при производстве небольших партий ножей.	– ограничение по размерам ножа, соответственно, диаметром геохода; – требуются дополнительные затраты для снятия припусков на механическую обработку – требуется технологическая специальная оснастка со сложной конструкцией и криволинейными поверхностями, что увеличивает трудоемкость изготовления ножа ИО..
Гибка	– высокий коэффициент использования материалов; – высокая точность и качество получаемых поверхностей; – не требуется дополнительная термическая обработка тела ножа исполнительного органа для упрочнения структуры; – простота технологической оснастки по сравнению с другими технологиями в связи с отсутствием необходимости обработки всей поверхности тела ножа исполнительного органа; – возможности применения типового маршрута обработки ножей.	– ограничение по размерам и формам ножа, что увеличивает трудоемкость изготовления тела ножа ИО; – требуется разработка специализированного оборудования и технологической оснастки; – существует ограничение по материалам.
Селективное лазерное сплавление (СЛС)	– высокий коэффициент использования материалов; – целесообразный вариант технологии при единичном производстве; – не требуется разработки специальной технологической оснастки; – высокая точность размеров и формы ножа ИО; – можно использовать разные сплавы для создания ножей, что обеспечивает высокую прочность и плотность.	– высокая стоимость оборудования и материалов для изготовления; – сложно обеспечивать равномерную структуру механических свойств материалов из-за больших размеров тела ножа ИО геохода; – низкое качество поверхности из-за используемой технологии процесса.

Особенности применения способов получения заготовки зависят в первую очередь от типа производства, технологических возможностей и других факторов. В данном случае для создания ножей и отвала ИО в мелкосерийном производстве целесообразно использовать метод гибки как способ получения заготовки. Для мелкосерийного производства гибка является целесообразным вариантом технологии получения, так как после гибки потребуются минимальные затраты на

снятие припусков для формирования режущей кромки, при этом обеспечивается повышенная пластичность и вязкость заготовок, однородная структура и снимается внутреннее напряжение.

4.4 Влияние конструктивных решений НИО геохода на технологические и силовые параметры взаимодействия его с породой

На основе конструктивных параметров, полученных в п. 4.1, и технологических решений по созданию основных элементов ИО геохода, описанных в п. 4.3, определяются параметры (п. 2.1 и п. 2.4) для оценки технических решений НИО геохода.

По разработанным 3D моделям заготовки разного типоразмера отвалов НИО геохода при литейной технологии и обработке давлением получена масса заготовки. Для заготовки, полученной способом СЛС, была использована специализированная платформа [47, 85] для определения технологических параметров, таких как масса детали, объем материала, объем вспомогательного материала (поддержек), время печати и другие параметры.

По формуле (2.1) исходя из этих данных рассчитывался коэффициент использования материала для разной формы отвала НИО геохода разных типоразмеров. На рисунке 4.11 приведена зависимость $K_{им}$ от радиуса геохода r_z для отвалов НИО прямой геликоидной формы при разных технологиях получения заготовки отвала.

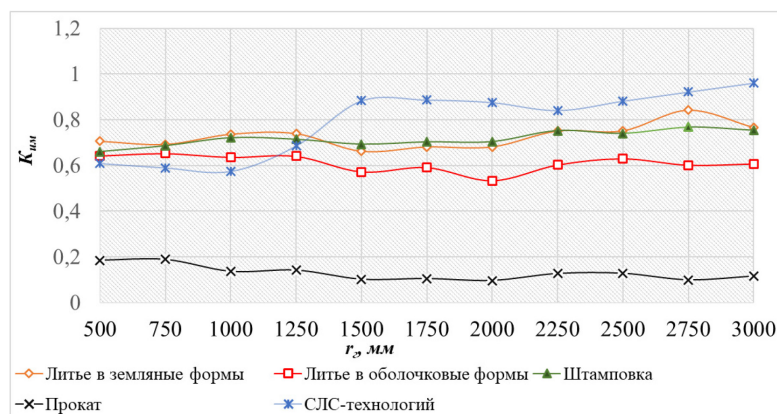


Рисунок 4.11 – Зависимость $K_{им}$ от r_z для отвалов НИО прямой геликоидной формы

Наиболее эффективной технологией является СЛС-технология при $r_2 > 1500$ мм, где коэффициент использования материалов достигает 0,85, при $r_2 < 1500$ мм – литье в земельной форме, наименьший коэффициент использования наблюдается при способе прокат, что делает эту технологию менее выгодной для отвалов НИО прямой геликоидной формы.

На рисунке 4.12 приведена зависимость $K_{им}$ от радиуса геихода r_2 для отвалов НИО полувыпуклой геликоидной формы при разных технологиях получения заготовки отвала.

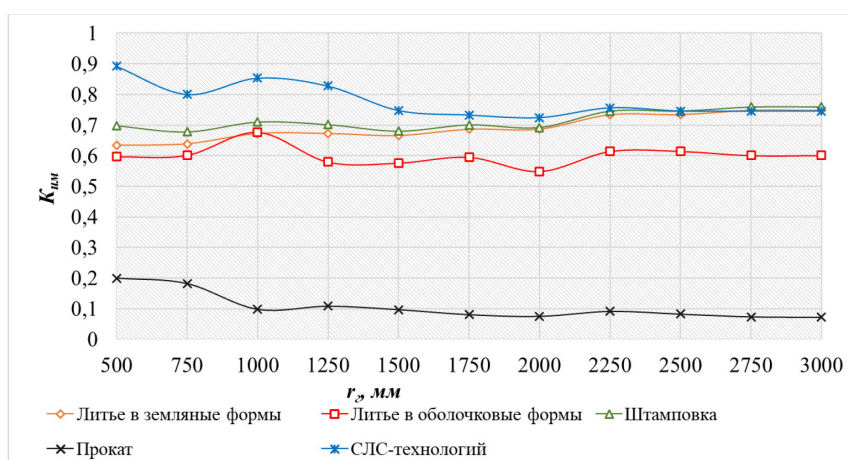


Рисунок 4.12 – Зависимость $K_{им}$ от r_2 для отвала НИО полувыпуклой геликоидной формы

Для отвалов НИО полувыпуклой геликоидной формы при всех значениях r_2 технология СЛС остается наиболее эффективной с коэффициентом $K_{им}=0,9$, литье в оболочковые формы также показывает высокий коэффициент ($K_{им}=0,7$), что делает его рациональным способом.

На рисунке 4.13 приведена зависимость $K_{им}$ от радиуса геихода r_2 для отвалов НИО геликоидной формы с воронкой при разных технологиях получения заготовки отвалов.

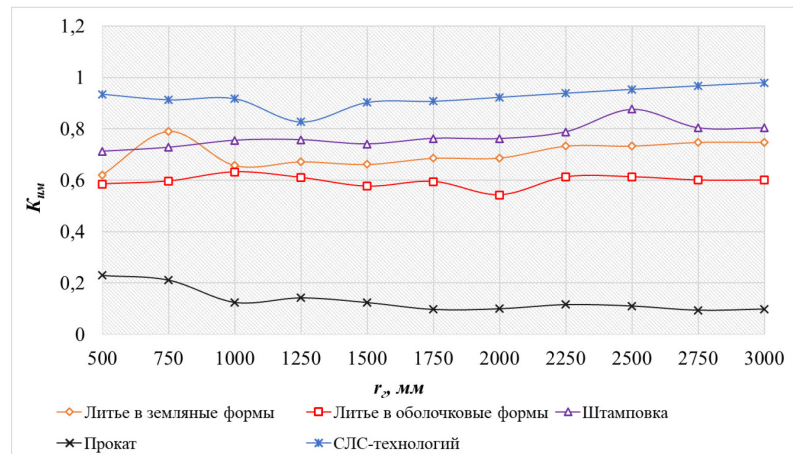


Рисунок 4.13 – Зависимость $K_{им}$ от r_g для отвалов НИО геликоидной формы с воронкой

Максимальный коэффициент использования материалов (0,9) достигается при применении СЛС-технологий, что делает эту технологию предпочтительной для отвалов геликоидной формы с воронкой, литье в оболочковые формы является подходящим на уровне 0,6, что может быть экономически оправданным выбором.

На рисунке 4.14 приведена зависимость $K_{им}$ от радиуса геолода r_g для отвалов НИО выпуклой геликоидной формы при разных технологиях получения заготовки отвала.

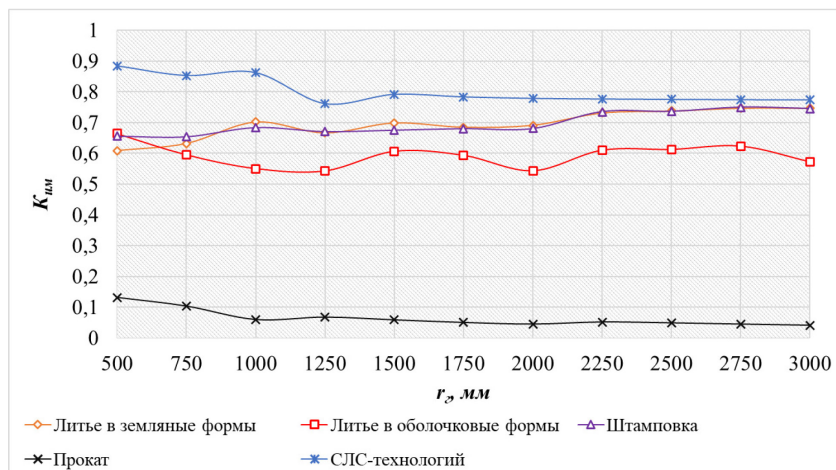


Рисунок 4.14 – Зависимость $K_{им}$ от r_g для отвалов НИО выпуклой геликоидной формы

Зависимость показывает, что наибольший коэффициент использования материалов (около 0,95) достигается при применении SLM, что делает эту технологию наиболее эффективной для отвалов выпуклой геликоидной формы,

литье в земляные формы имеет коэффициент около 0,6, что делает его менее выгодным по сравнению с другими способами.

Таким образом, полученные зависимости коэффициента использования материалов $K_{им}$ от радиуса геолода r_2 для всех форм отвалов показывают, что наименьший расход материалов достигается у полувыпуклой формы, где коэффициент использования материалов ($K_{им}$) при $r_2=3000$ мм для СЛС-технологий составляет 0,85-0,9, тогда как у прямой формы и геликоидной с воронкой значения ниже на 15-20%.

По формуле (2.2) исходя из полученных данных рассчитывалась технологическая себестоимость для разных форм отвалов НИО геолода разного типоразмера. На рисунке 4.15 приведена зависимость T_c от радиуса геолода r_2 для отвала НИО прямой геликоидной формы при разных технологиях получения заготовки отвала.

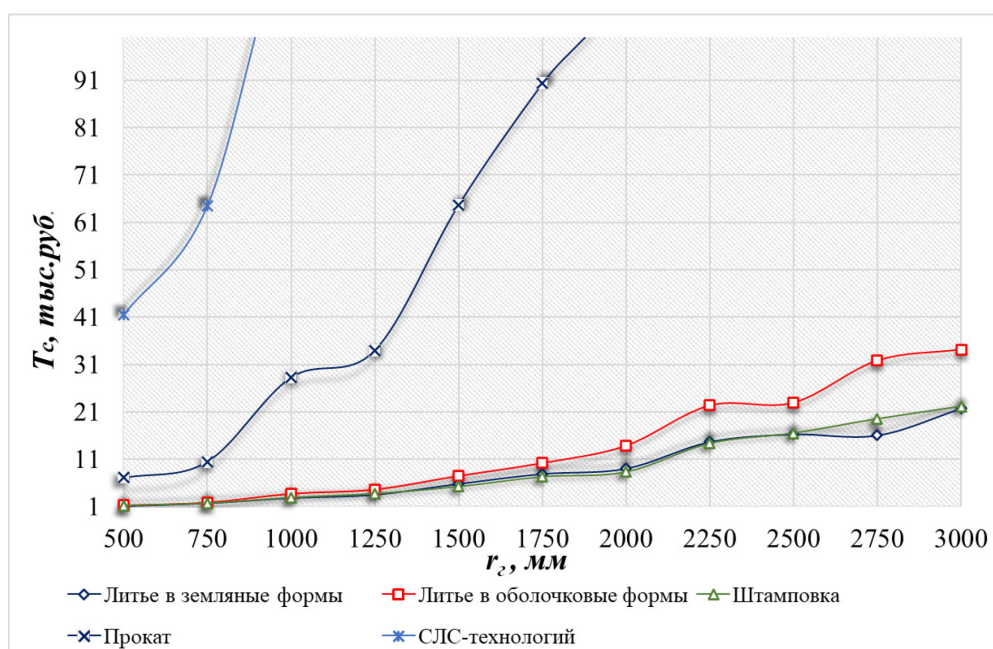


Рисунок 4.15 – Зависимость T_c от r_2 для отвала НИО прямой геликоидной формы

Для отвалов прямой геликоидной формы при радиусе геолода $r_2=1000$ мм штамповка дешевле литья в земельной форме на 35%, при радиусе геолода $r_2=2500$ мм прокат технологически выгоднее штамповки на 12 %.

На рисунке 4.16 приведена зависимость T_c от радиуса геолода r_2 для отвалов НИО полувыпуклой геликоидной формы при разных технологиях получения заготовки отвала.

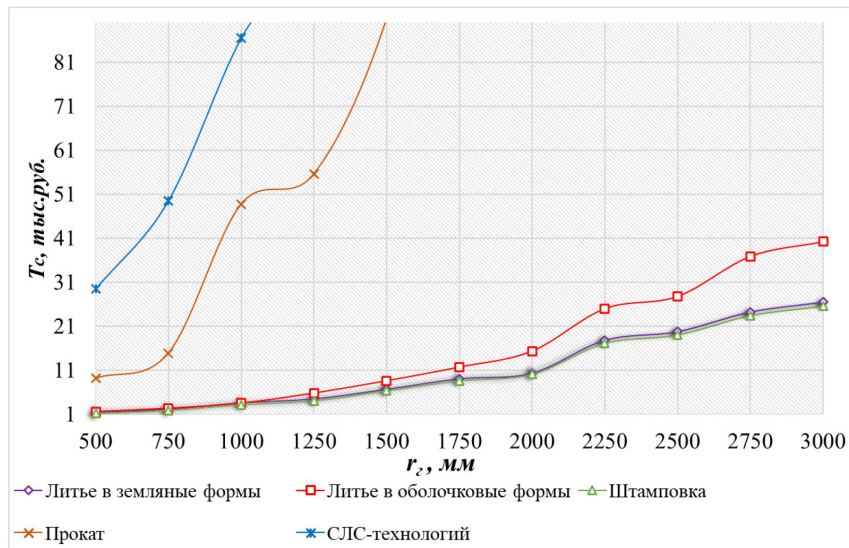


Рисунок 4.16 – Зависимость T_c от r_2 для отвала НИО полувыпуклой геликоидной формы

Для полувыпуклой формы при радиусе геихода $r_2=750$ мм литейное производство в оболочковые формы на 28% дороже проката, а при $r_2=2000$ мм для СЛС-технологий более чем в 4 раза превышает стоимость штамповки.

На рисунке 4.17 приведена зависимость T_c от радиуса геихода r_2 для отвалов НИО геликоидной формы с воронкой при разных технологиях получения заготовки отвала.

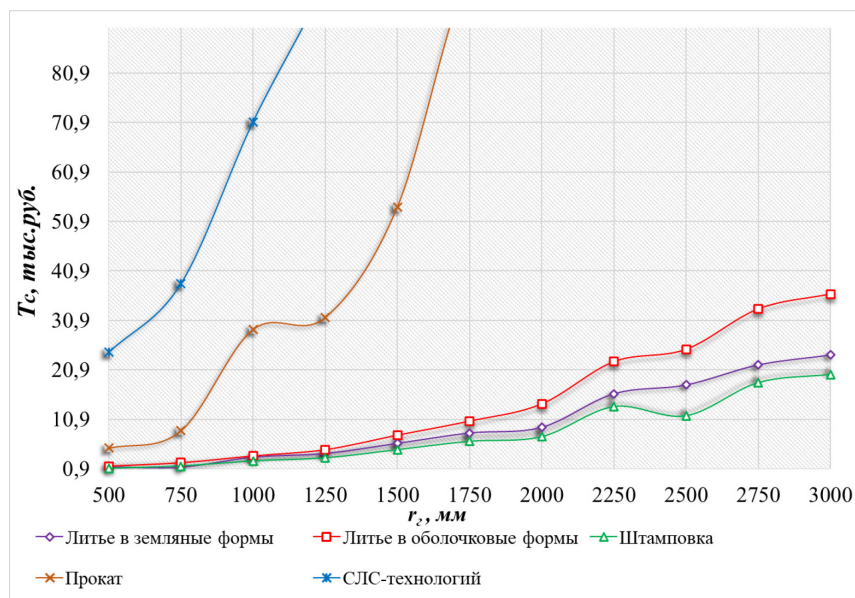


Рисунок 4.17 – Зависимость T_c от r_2 для отвала НИО геликоидной формы с воронкой

Для геликоидной с воронкой при $r_2=1500$ мм штамповка и прокат имеют примерно одинаковую себестоимость, но дешевле литья на 40%, тогда как при $r_2=3000$ мм литейное производство в земные формы дороже проката на 60%.

На рисунке 4.18 приведена зависимость T_c от радиуса геوخода r_z для отвалов НИО выпуклой геликоидной формы при разных технологиях получения заготовки отвала.

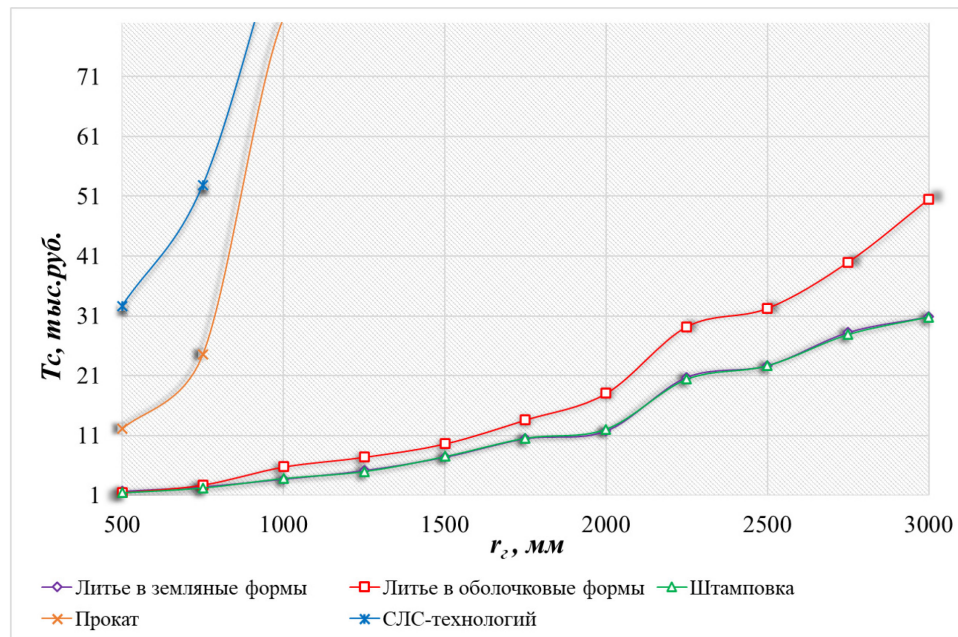


Рисунок 4.18 – Зависимость T_c от r_z для отвала НИО выпуклой геликоидной формы

Для выпуклой формы при $r_z=500$ мм литейное производство дешевле СЛС-технологий в 5 раз, но при $r_z=2000$ мм штамповка на 25% выгоднее, чем литейное производство в оболочковых формах.

Для анализа конструкции и улучшения эксплуатационных показателей НИО оценивается воздействие различных конструктивных решений на параметры силового взаимодействия с породой.

Из усовершенствованной математической модели взаимодействия ножей геликоидной формы с затупленной режущей кромкой ИО геوخода с породой забоя (п. 2.4) получена зависимость силовых параметров, таких как силы сопротивления грунта при резании, которые зависят от ширины среза и воздействуют на ось вращения $P_{o.cb}$, силы сопротивления грунта, спроецированные перпендикулярно оси вращения $R_{u.o.cb}$, момент сопротивления резанию, возникающий в результате проекции силы сопротивления грунта при резании $M_{u.o.cb}$, от радиуса геوخода r_z при разных значениях радиуса затупления кромки ножа $r_{зат}$ для полувыпуклой формы ножа ИО геوخода. На рисунке 4.19 приведена зависимость силы сопротивления

грунта резанию на ось вращения $P_{o.cв}$, от радиуса геохода r_z при разных значениях радиуса затупления кромки ножа $r_{зам}$ для полувыпуклой формы ножа ИО геохода.

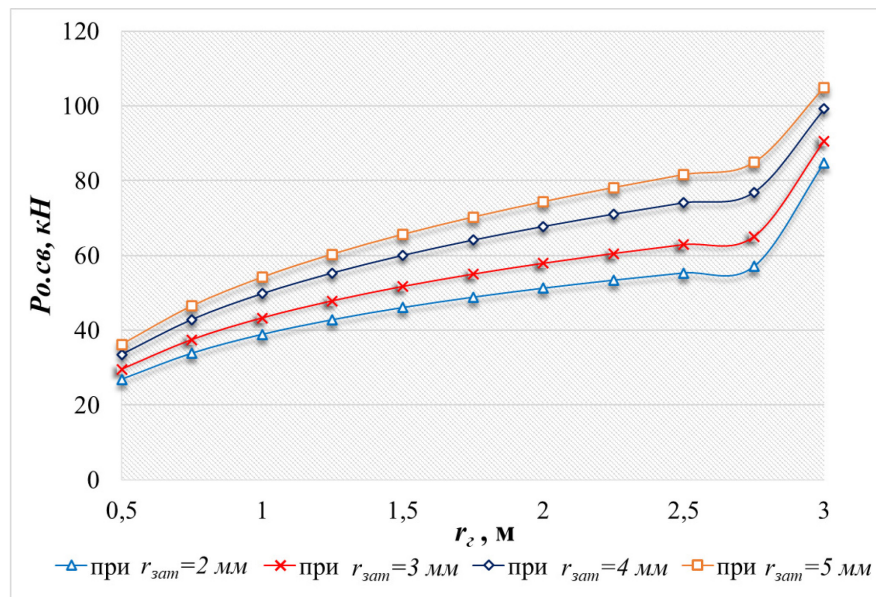


Рисунок 4.19 – Зависимость $P_{o.cв}$ от радиуса геохода r_z при разных значениях радиуса затупления кромки ножа $r_{зам}$ для полувыпуклой формы ножа ИО геохода

С увеличением радиуса геохода наблюдается рост проекции силы сопротивления резанию $P_{o.cв}$ для всех исследованных значений радиуса затупления кромки $r_{зам}$, увеличение силы сопротивления $P_{o.cв}$ при радиусе затупления кромки $r_{зам}$ с 2 мм до 5 мм достигает примерно 50-55%.

На рисунке 4.20 приведена зависимость силы сопротивления грунта резанию на плоскость, перпендикулярную оси вращения $R_{u.o.cв}$, от радиуса геохода r_z при разных значениях радиуса затупления кромки ножа $r_{зам}$ для полувыпуклой формы ножа ИО геохода.

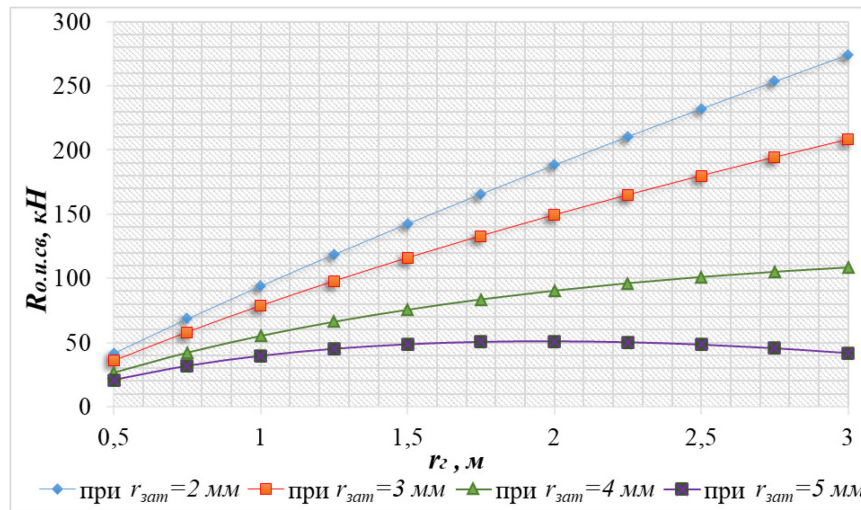


Рисунок 4.20 – Зависимость $R_{u.o.cb}$ от радиуса геолода r_2 при разных значениях радиуса затупления кромки ножа $r_{зам}$ для полувыпуклой формы ножа ИО геолода

Для минимального радиуса затупления кромки ($r_{зам} = 2$ мм) наблюдается наиболее интенсивный рост силы сопротивления резанию $R_{u.o.cb}$, для больших значений радиуса затупления ($r_{зам} = 5$ мм) увеличение радиуса геолода практически не влияет на силу сопротивления резанию $R_{u.o.cb}$: линия на графике почти горизонтальна, а рост $R_{u.o.cb}$ за все исследуемое изменение радиуса составляет менее 10%.

На рисунке 4.21 приведена зависимость момента сопротивления резанию от проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию $M_{u.o.cb}$ от радиуса геолода r_2 при разных значениях радиуса затупления кромки ножа $r_{зам}$ для полувыпуклой формы ножа ИО геолода.

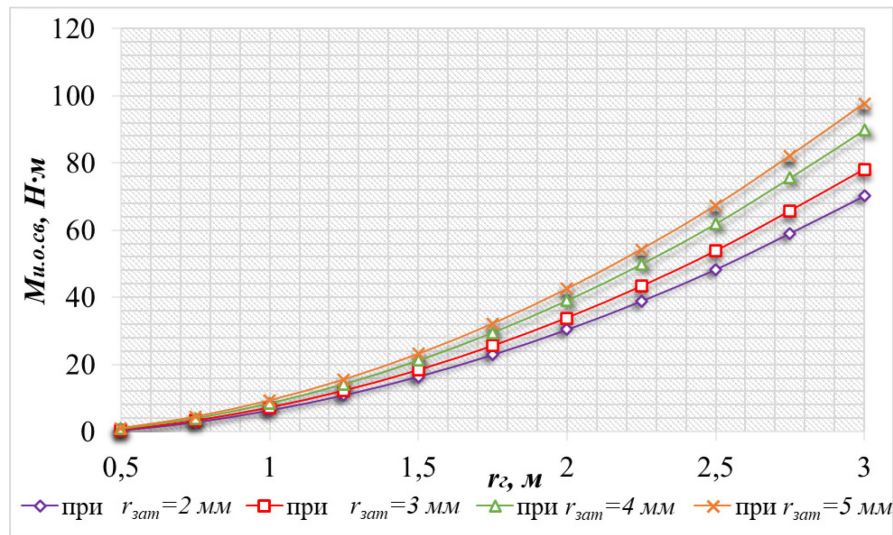


Рисунок 4.21 – Зависимость $M_{u.o.cv}$ от радиуса геохода r_z при разных значениях радиуса затупления кромки ножа $r_{зам}$ для полувыпуклой формы ножа ИО геохода

Зависимость момента сопротивления резанию $M_{u.o.cv}$ от радиуса геохода r_z носит нелинейный характер для всех случаев, при увеличении радиуса затупления ножа $r_{зам}$ с 2 мм до 5 мм $M_{u.o.cv}$ увеличивается примерно на 50%.

Далее получены зависимости силовых параметров $P_{o.cv}$, $R_{u.o.cv}$ и $M_{u.o.cv}$ от радиуса кривизны $r_{кр}$ при разных значениях радиуса геохода r_z для полувыпуклой формы ножа ИО. На рисунке 4.22 приведена зависимость силы сопротивления грунта резанию на ось вращения $P_{o.cv}$ от радиуса кривизны $r_{кр}$ при разных значениях радиуса геохода r_z для полувыпуклой формы ножа ИО.

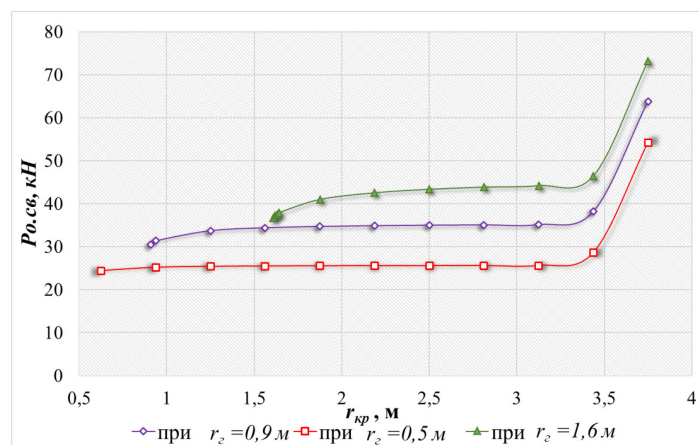


Рисунок 4.22 – Зависимость $P_{o.cv}$ от радиуса кривизны $r_{кр}$ при разных значениях радиуса геохода r_z для полувыпуклой формы ножа ИО

Характер изменения проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию $P_{o.cв}$ мало зависит от изменения значения $r_{кр}$ при различных типоразмерах геоходов, при радиусе геохода $r_z = 1,6$ м и увеличении радиуса кривизны $r_{кр}$ с 0,5 до 3,6 м значение $P_{o.cв}$ возрастает с 35 до 75 кН, что делает данную конструкцию непереподходящей для высоких нагрузок.

На рисунке 4.23 изображена зависимость сопротивления грунта при резании на плоскость, перпендикулярную оси вращения $R_{u.o.cв}$, в зависимости от радиуса кривизны $r_{кр}$. Эта зависимость исследуется при различных значениях радиуса геохода r_z для полувыпуклой формы ножа ИО.

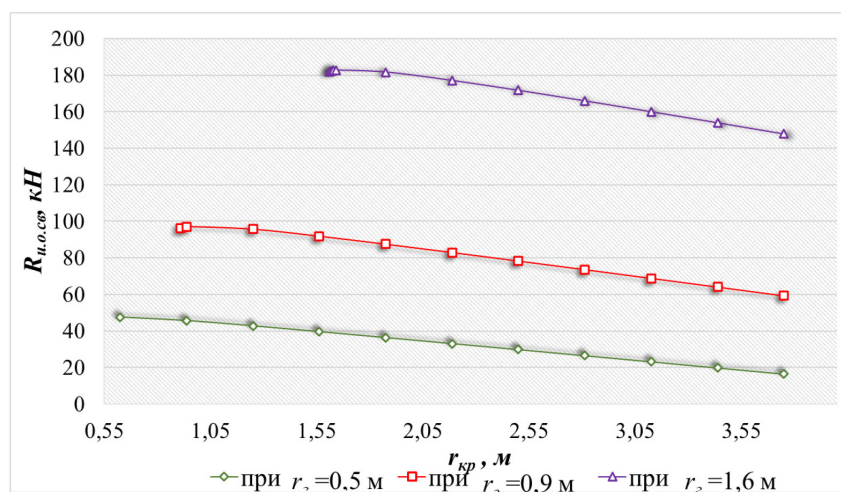


Рисунок 4.23 – Зависимость $R_{u.o.cв}$ от радиуса кривизны $r_{кр}$ при разных значениях радиуса геохода r_z для полувыпуклой формы ножа ИО

Увеличение радиуса кривизны $r_{кр}$ снижает проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию $R_{o.cв}$, особенно при максимальных значениях радиуса геохода r_z .

На рисунке 4.24 приведена зависимость момента сопротивления резанию от проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию $M_{u.o.cв}$ от радиуса кривизны $r_{кр}$ при разных значениях радиуса геохода r_z для полувыпуклой формы ножа ИО.

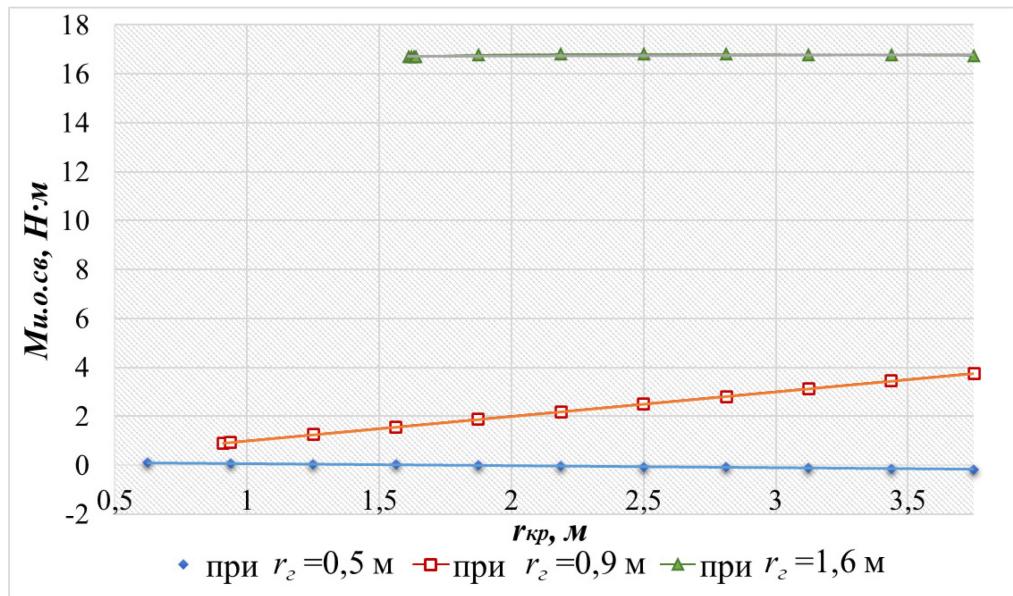


Рисунок 4.24 – Зависимость $M_{и.о.св}$ от радиуса кривизны $r_{кр}$ при разных значениях радиуса геохода r_z для полувыпуклой формы ножа ИО

Наибольшее влияние изменение радиуса кривизны $r_{кр}$ НИО оказывает на момент сопротивления резанию $M_{и.о.св}$ для средних значений радиуса геохода, и зависимость является линейной, а для минимальных и максимальных значений радиуса геохода r_z этого влияния практически не наблюдается.

Получены зависимости силовых параметров $P_{о.св}$, $R_{и.о.св}$ и $M_{и.о.св}$ от шага внешнего движителя геохода h_6 при разных значениях радиуса геохода r_z для полувыпуклой формы ножа ИО. На рисунке 4.25 приведена зависимость силы сопротивления грунта резанию на ось вращения $P_{о.св}$, от шага внешнего движителя геохода h_6 при разных значениях радиуса геохода r_z для полувыпуклой формы ножа ИО.

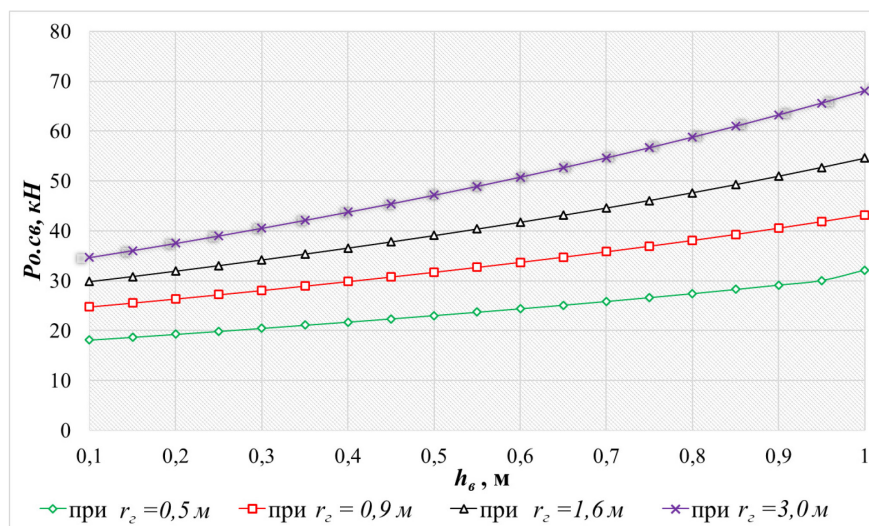


Рисунок 4.25 – Зависимость $P_{o.cв}$ от шага внешнего движителя геохода h_6 при разных значениях радиуса геохода r_2 для полувыпуклой формы ножа ИО

Увеличение r_2 от 0,5 до 1,6 м вызывает более чем в 2,5 раза рост проекции силы сопротивления грунта при резании $P_{o.cв}$.

На основании данных рисунка 4.26 можно заметить, как сила сопротивления грунта при резании, перпендикулярная оси вращения $R_{u.o.cв}$, изменяется в зависимости от шага внешнего движителя геохода h_6 при различных значениях радиуса r_2 для полувыпуклой формы ножа ИО.

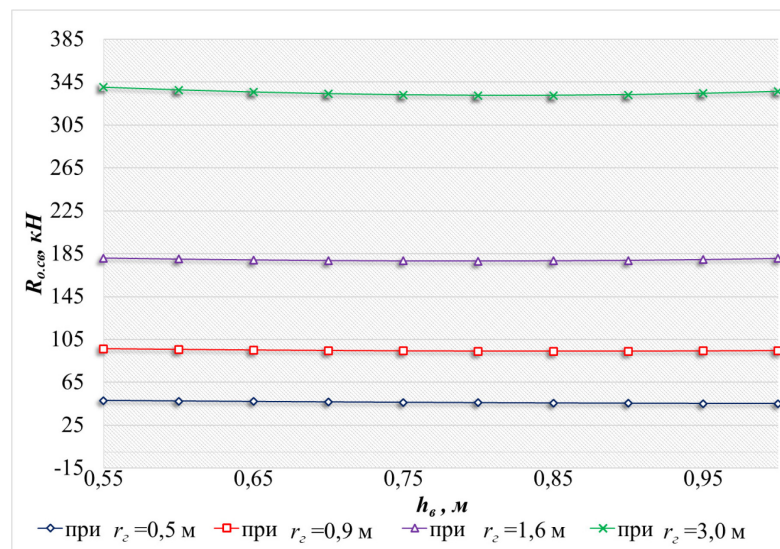


Рисунок 4.26 – Зависимость $R_{u.o.cв}$ от шага внешнего движителя геохода h_6 при разных значениях радиуса геохода r_2 для полувыпуклой формы ножа ИО

Проекция составляющей силы сопротивления грунта резанию $R_{u.o.cв}$ изменяется в пределах 1-2% при изменении h_6 , что характеризуется наиболее стабильными значениями, и слабо реагирует на изменение шага h_6 .

На рисунке 4.27 приведена зависимость момента сопротивления резанию от проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию $M_{u.o.cв}$ от шага внешнего движителя геохода h_6 при разных значениях радиуса геохода r_2 для полувыпуклой формы ножа ИО.

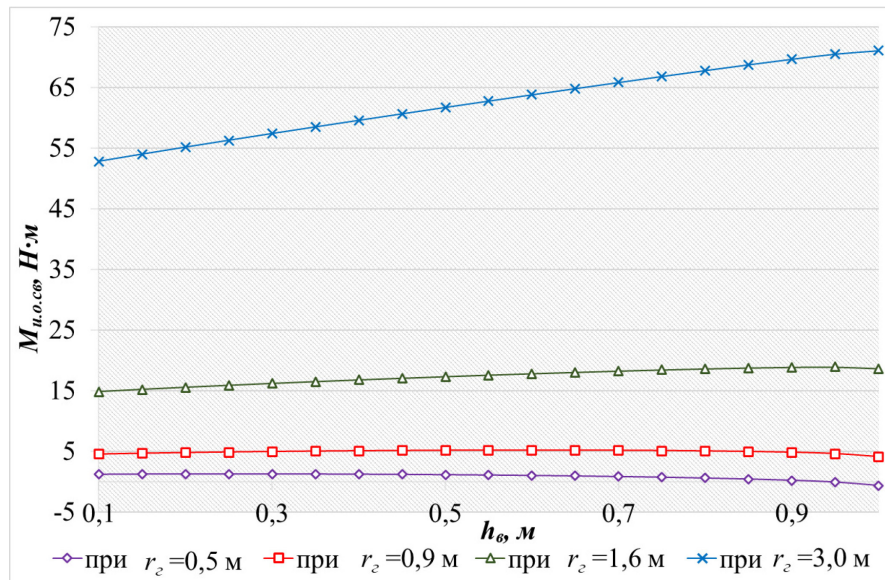


Рисунок 4.27 – Зависимость $M_{u.o.св}$ от шага внешнего движителя геохода h_v при разных значениях радиуса геохода r_z для полувыпуклой формы ножа ИО

Момент сопротивления резанию от проекции составляющей силы сопротивления грунта резанию $M_{u.o.св}$ увеличивается при изменении шага внешнего движителя h_v на 37%, 30% и 18% соответственно для $r_z=0,5 \text{ м}$, $0,9 \text{ м}$ и $1,6 \text{ м}$.

Таким образом, зависимости силовых параметров от шага внешнего движителя геохода показывают, что увеличение шага внешнего движителя h_v приводит к росту силовых параметров системы, особенно для небольших радиусов геохода.

4.5 Топологическая оптимизация формы ножей исполнительного органа геохода с учетом особенностей его работы и условий эксплуатации

Топологическая оптимизация формы применяется для упрощения геометрии ножа с целью улучшения характеристик, таких как прочность, жесткость, вес и т.д. [95-101]. В данной работе рассматриваем оптимизацию с целью уменьшения массы и сохранения прочностных свойств и жесткости ножа ИО. Для реализации и получения оптимизированных форм предполагается применить метод аддитивной технологии – СЛС технологию. В качестве материала применяется инструментальная сталь AISI H13.

Кинематические граничные условия и схема нагружения для разной формы ножа принимаются такие же, как и ранее. Кроме того, необходимо учесть следующие требования для оптимизированных форм ножей:

- оптимизированные формы ножей должны быть с учетом специфики работы проходческого агрегата и его рабочих условий, чтобы обеспечить наилучшее качество резания и обработки горной породы;
- ножи не должны подвергаться разрушению от заданных внешних нагрузок;
- ножи не должны иметь остаточных деформаций (в 1,25 раза меньше расчетных);
- максимальные линейные перемещения не должны превышать 5 мм;
- необходимо сохранить целостность конструкции тела ножа ИО без формирования сквозных отверстий;
- необходимо сохранить достаточный слой материала передней и задней поверхности для дальнейшей механической обработки режущей кромки ножа;
- необходимо сохранить геометрии плоскостей для правильного базирования ножа при механической обработке.

Процесс топологической оптимизации производился в специализированной ПО Solidworks. Топологическая оптимизация в Solidworks – это метод оптимизации деталей, который позволяет автоматически удалять избыточный материал и улучшать конструкцию для достижения оптимальной прочности и жесткости при минимальном весе [98]. В программе Solidworks доступен инструмент Topology Study, который позволяет проводить топологическую оптимизацию деталей. Таким образом, использование топологической оптимизации в программе Solidworks позволяет создавать более эффективные и оптимизированные детали, что может привести к снижению затрат на материалы и улучшению характеристик конструкции.

Для оптимизации формы ножей был задан критерий достижения максимальной жесткости при целевых параметрах массы. Исходя из заданных условий эксплуатации и сформулированных требований, возникающих нагрузок в

результате исследования была получена сетка для решения топологической оптимизации формы ножей (рисунок 4.28).

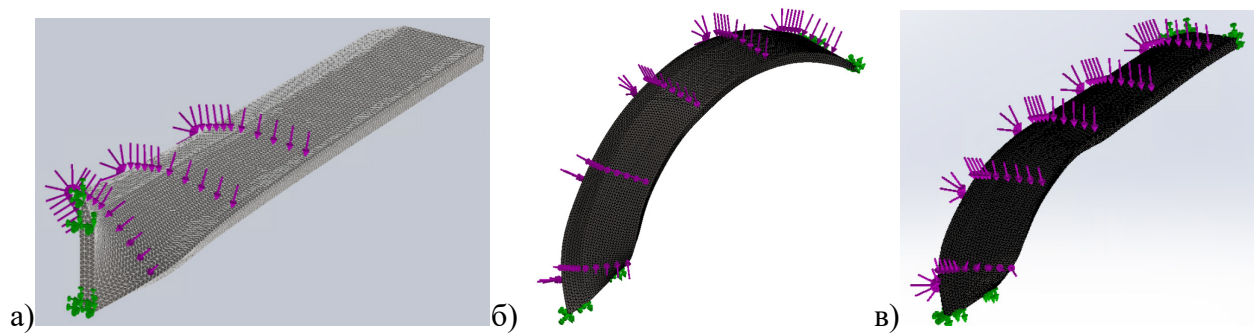


Рисунок 4.28 – Полученная сетка для решения топологической оптимизации формы ножа

(а – прямой геликоидной формы, б – выпуклой геликоидной формы, в – геликоидной формы с воронкой)

После получения сетки для решения задач по топологической оптимизации была получена эпюра распределения массы материала для удаления и сокращения массы с целью сохранения достаточной жесткости конструкции (рисунок 4.29).

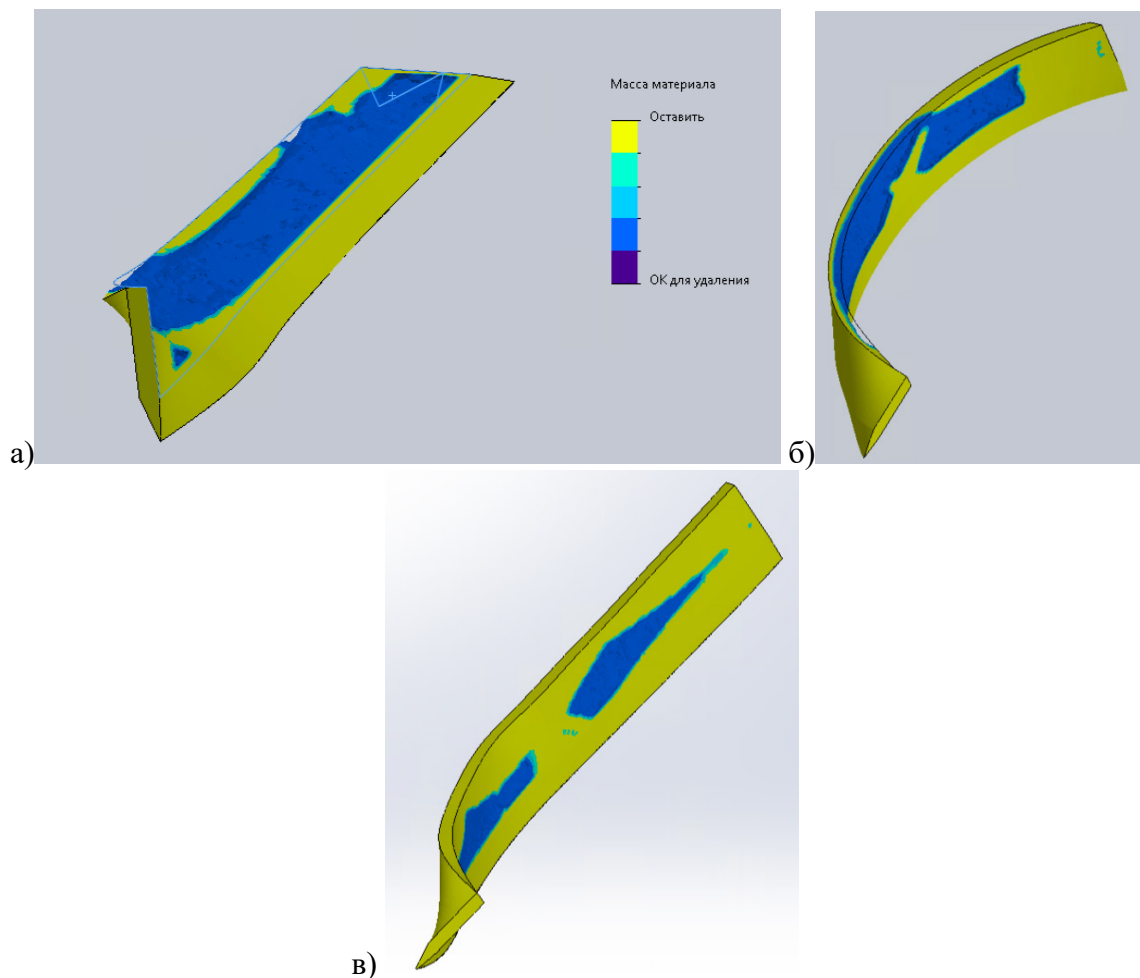


Рисунок 4.29 – Процесс топологической оптимизации формы ножей

(а – прямой геликоидной формы, б – выпуклой геликоидной формы, в – геликоидной формы с воронкой)

После проведения ряда итераций получены новые геометрии формы, которые удовлетворяют условиям жесткости конструкции, были получены графики сходимости (рисунок 4.30) для значения массы ножей и графики сходимости по наилучшему значению жесткости конструкции (рисунок 4.31) для прямой геликоидной формы.

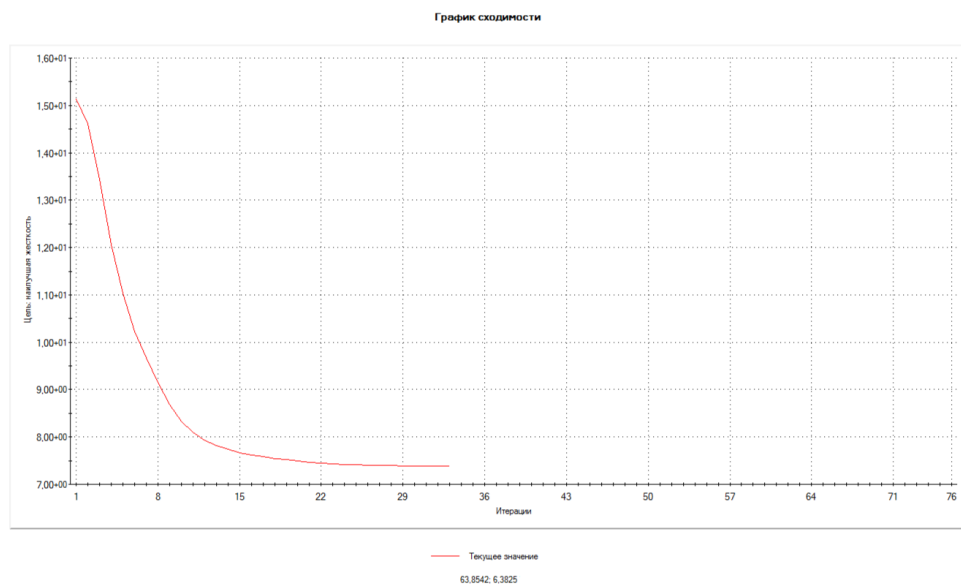


Рисунок 4.30 – График сходимости значений жесткости конструкции для прямой геликоидной формы

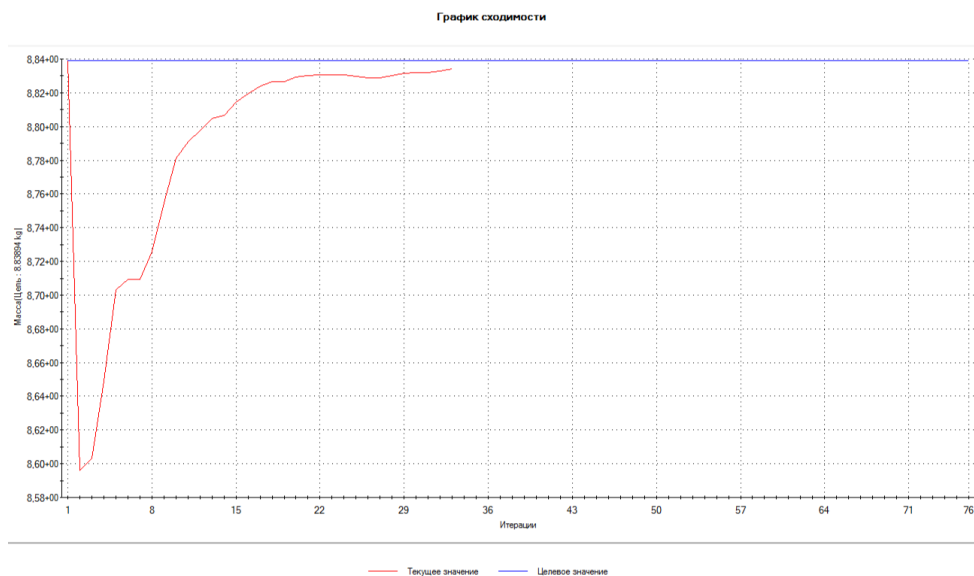


Рисунок 4.31 – График сходимости значений массы ножа для прямой геликоидной формы

После проведения ряда итераций получены новые геометрии формы, которые удовлетворяют условиям жесткости конструкции, были получены графики сходимости (рисунок 4.32) для значения массы ножей и графики сходимости по наилучшему значению жесткости конструкции (рисунок 4.33) для выпуклой геликоидной формы.

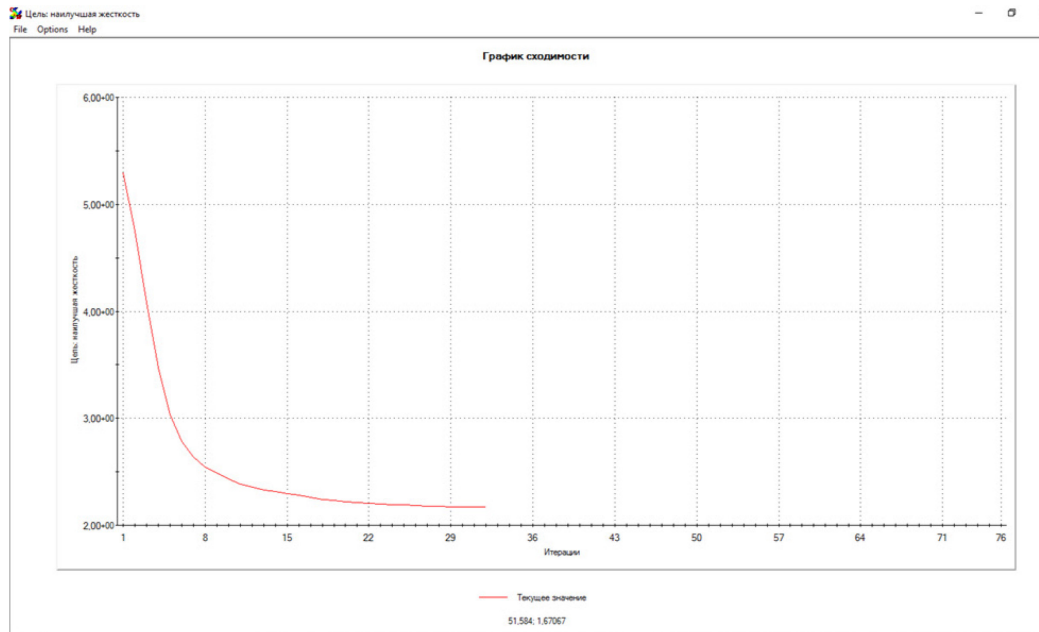


Рисунок 4.32 – График сходимости значений жесткости конструкции для выпуклой геликоидной формы

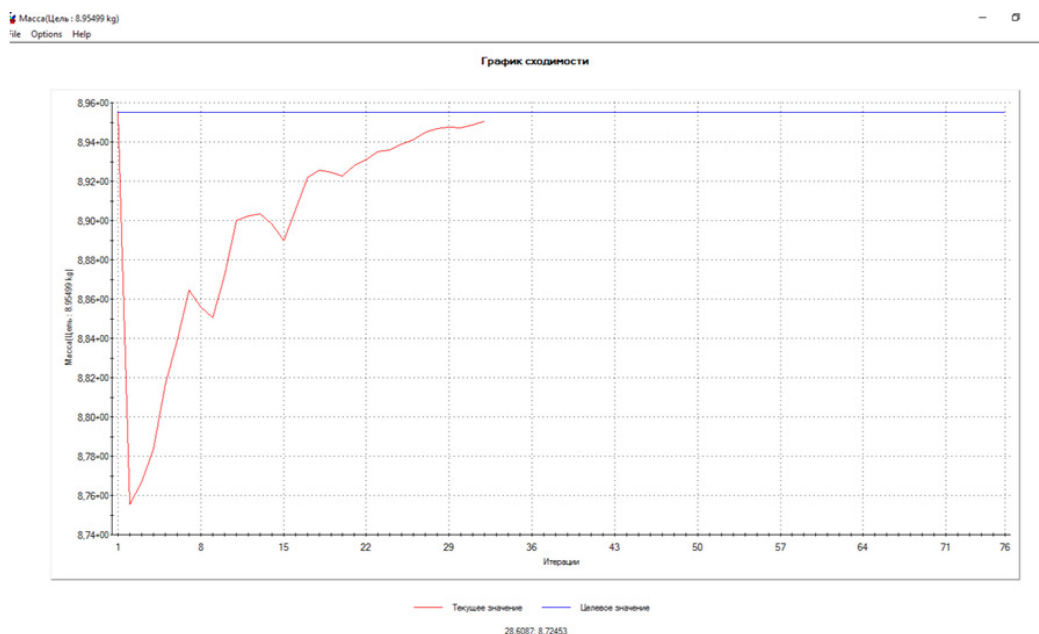


Рисунок 4.33 – График сходимости значений массы ножа для выпуклой геликоидной формы

После проведения ряда итераций получены новые геометрии формы, которые удовлетворяют условиям жесткости конструкции, были получены графики сходимости (рисунок 4.34) для значения массы ножей и графики сходимости по наилучшему значению жесткости конструкции (рисунок 4.35) для выпуклой геликоидной формы.

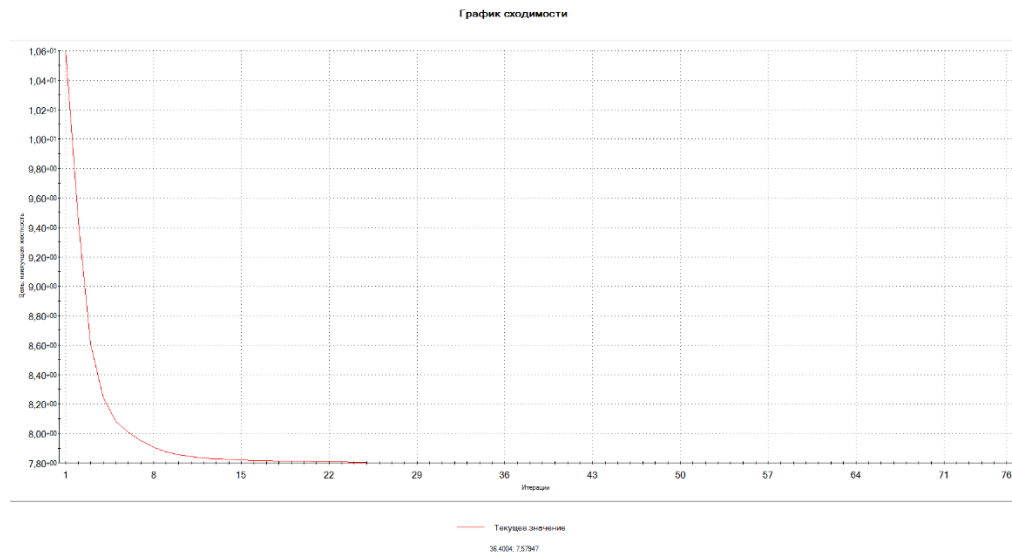


Рисунок 4.34 – График сходимости значений жесткости конструкции для геликоидной формы с воронкой

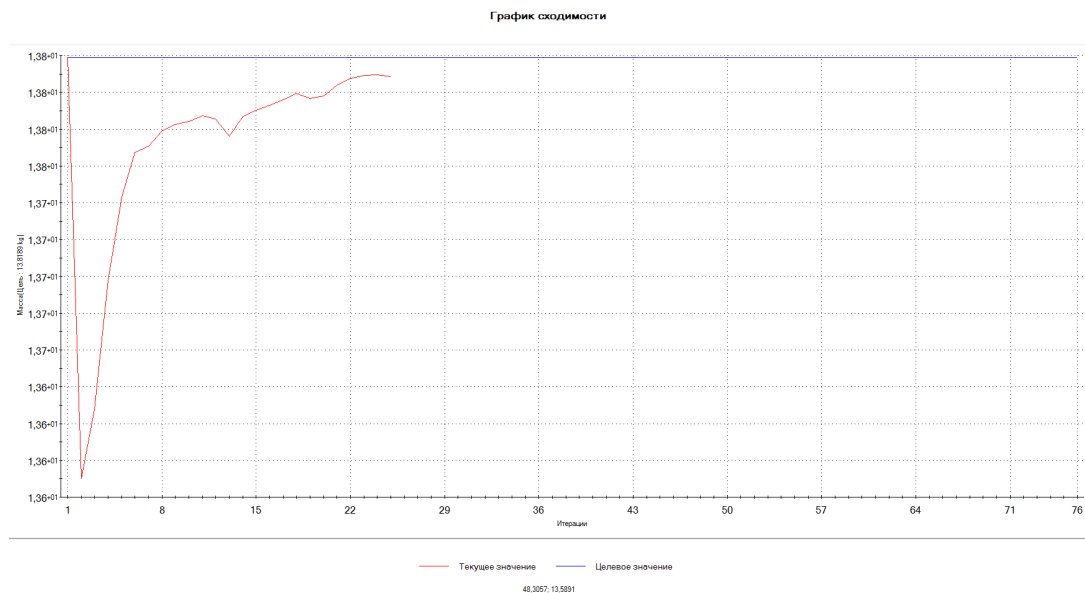


Рисунок 4.35 – График сходимости значений массы ножа для геликоидной формы с воронкой

В результате топологической оптимизации и удаления лишнего материала на 50% для ножа прямой геликоидной формы, на 45% для ножа выпуклой

геликоидной формы и на 15% для ножа геликоидной формы с воронкой, по результатам полученной эпюры распределение масс с сохранением достаточной жесткости конструкции была получена новая форма ножа прямой геликоидной формы, которая приведена на рисунке 4.36.

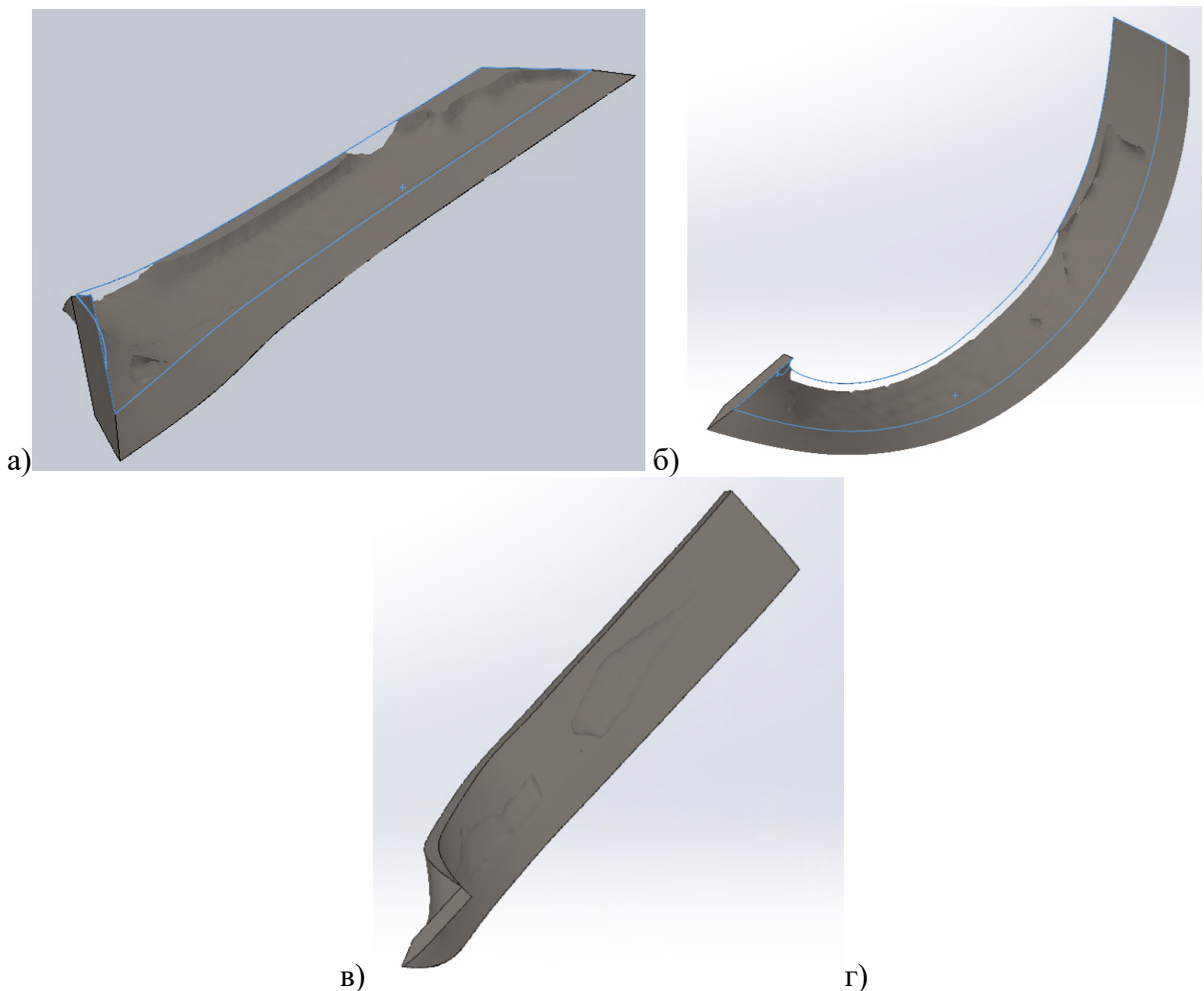


Рисунок 4.36 – Полученные формы ножей в результате топологической оптимизации (а – прямой геликоидной формы, б – выпуклой геликоидной формы, в – геликоидной формы с воронкой)

Для проверки выполнения условия прочности полученной новой формы ножа прямой геликоидной формы по результатам топологической оптимизации была получена эпюра распределения эквивалентных напряжений оптимизированной формы ножа, которая приведена на рисунке 4.37.

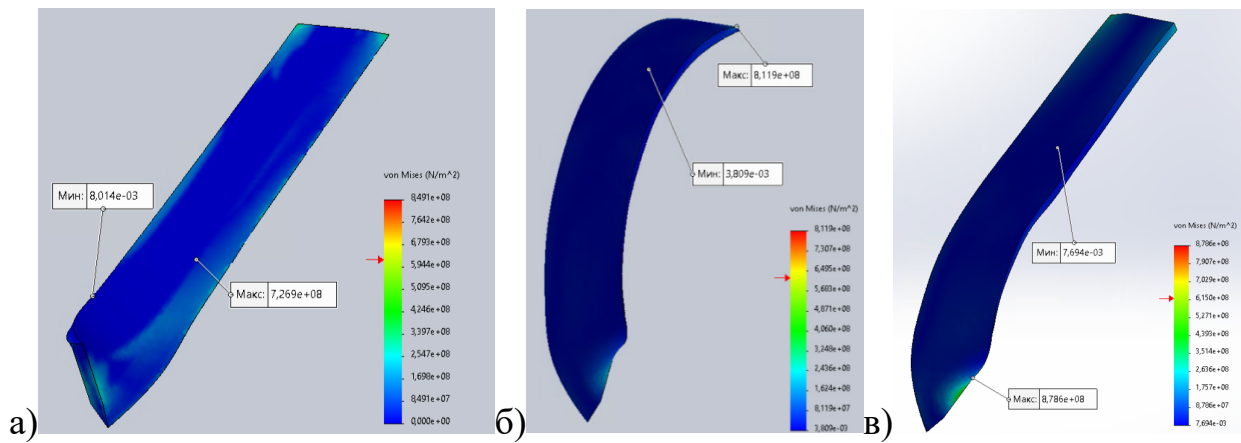


Рисунок 4.37 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений оптимизированной формы (а – прямой геликоидной формы, б – выпуклой геликоидной формы, в – геликоидной формы с воронкой)

Из эпюры распределения эквивалентных напряжений оптимизированной формы ножа прямой геликоидной формы следует отметить, что при уменьшении массы на 50% условия прочности при применении стали AISI H13 выполняются. На рисунке 4.38 приведена эпюра распределения радиальных перемещений оптимизированной формы ножа прямой геликоидной формы.

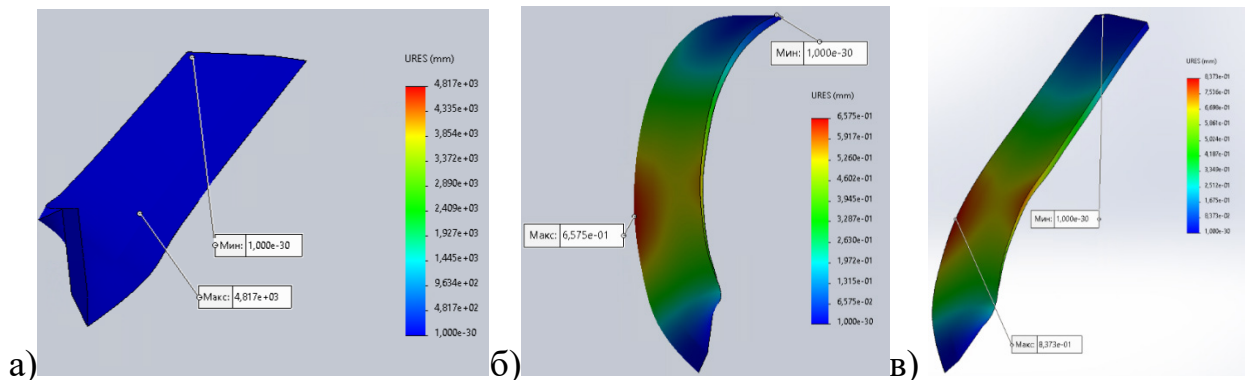


Рисунок 4.38 – Эпюра распределения радиальных перемещений оптимизированной формы (а – прямой геликоидной формы, б – выпуклой геликоидной формы, в – геликоидной формы с воронкой)

На рисунке 4.39 приведена эпюра результирующей деформации оптимизированной формы ножа прямой геликоидной формы.

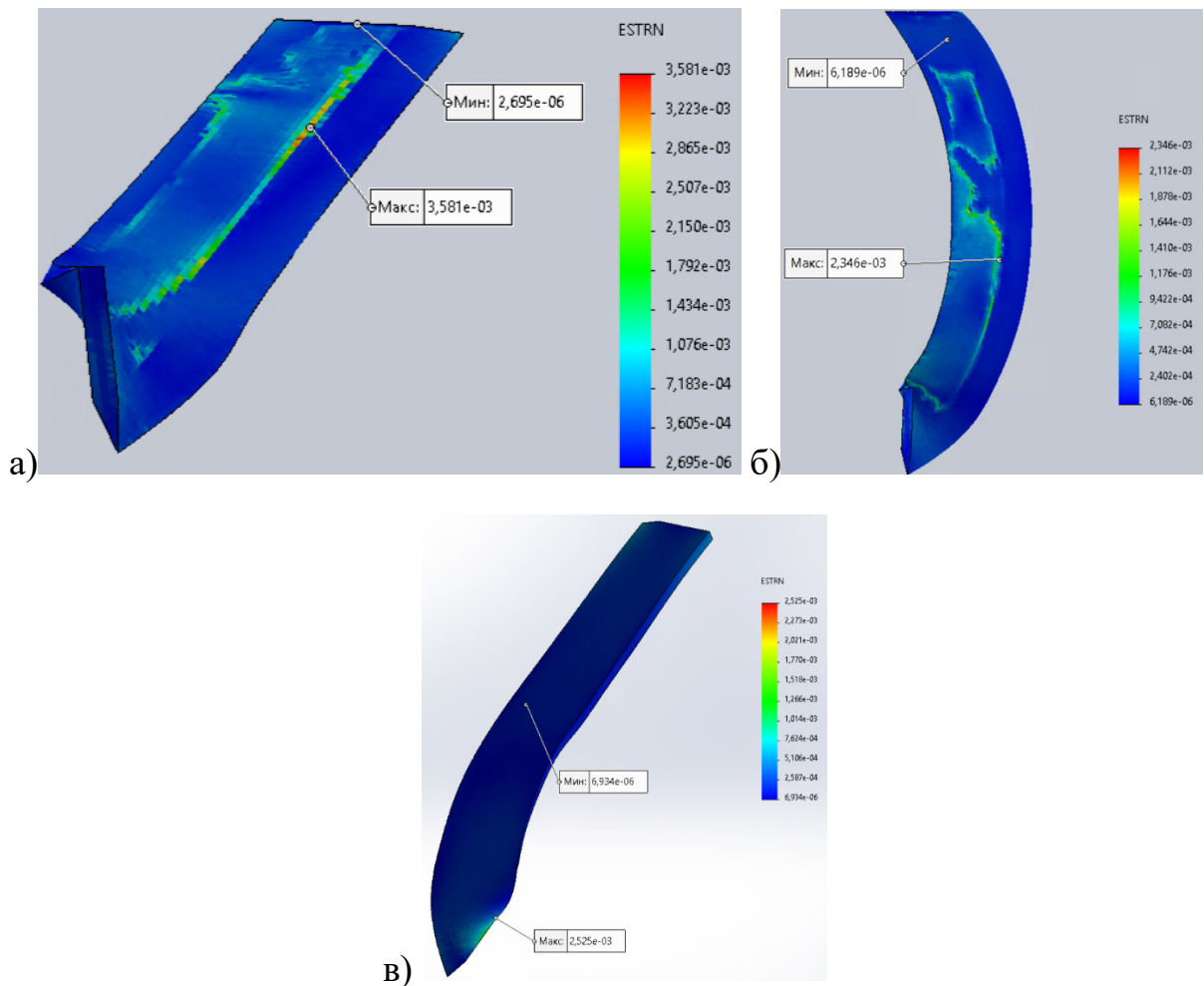


Рисунок 4.39 – Эпюры результирующей деформации оптимизированной формы ножа (а – прямой геликоидной формы, б – выпуклой геликоидной формы, в – геликоидной формы с воронкой)

Результаты топологической оптимизации формы ножей и полученные их значения приведены на в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Результаты топологической оптимизации формы ножей

Характеристики	Формы ножей		
	Прямая геликоидная	Выпуклая геликоидная	Геликоидная с воронкой
Исходная масса деталей, кг	17,9129	16,4785	16,4784
Коэффициент Якобонина	2,12	1,35	2,12
Масса детали с новой формой, кг	8,9564	9,0632	14,0066
Максимальное напряжение полученной формы, МПа	726,9	811,916	878,6
Максимальное радиальное перемещение полученной формы, мм	4,817	0,6575	0,8373
Коэффициент запаса прочности	1,376	1,232	1,2

С целью выявления зависимости процента уменьшения массы и возникающего максимального напряжения были рассмотрены различные проценты

уменьшения масс с сохранением достаточной жесткости конструкции. По полученным максимальным значениям напряжения был рассчитан коэффициент запаса прочности при разных значениях процента уменьшения массы, и на рисунке 4.40 приведена зависимость коэффициента запаса прочности ножей геликоидных форм от процента уменьшения массы.

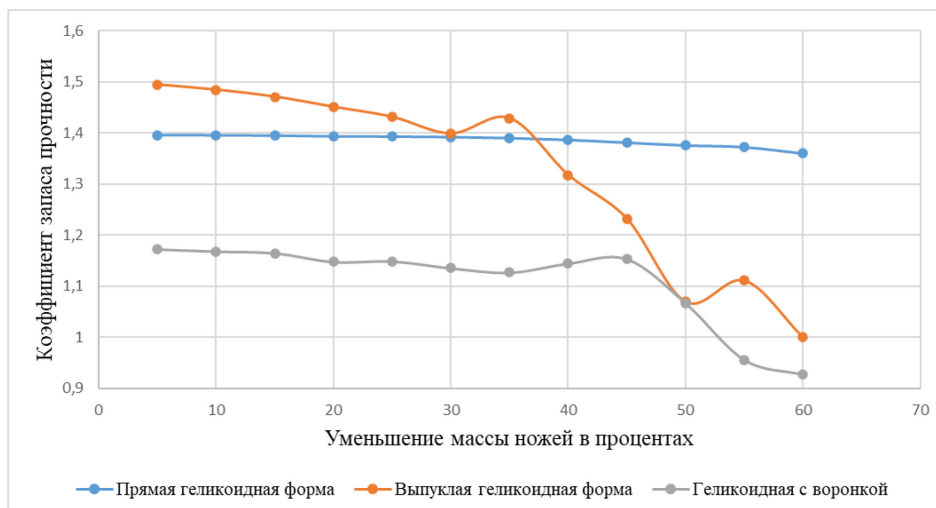


Рисунок 4.40 – Зависимость коэффициента запаса прочности ножей геликоидных форм от процента уменьшения массы.

В результате топологической оптимизации и полученных результатов следует отметить, что в эпюре эквивалентных напряжений распределение напряжений является неравномерным, это обуславливается обеспечением необходимых требований по максимизации жесткости конструкции. Результатом топологической оптимизации является снижение массы ножей при различных формах, для прямого ножа удалось снизить массу на 50%, для выпуклого на 45% и для геликоидной с воронкой на 15% с сохранением условия прочности и жесткости конструкции.

4.5 Выводы

1. В разделе определены конструктивные параметры НИО геохода, учитывающие взаимосвязь между радиусом геохода и углом закручивания поперечного сечения, что позволило эффективно разрабатывать конструкторско-технологические решения для создания его основных элементов.

2. В разделе приведены исследования по определению выбора материала для создания основных элементов геохода, учитывая особенности его работы и эксплуатации, и определено, что для создания основных элементов ИО литьем нужно использовать сталь 30ХГСА, при обработке давлением – сталь 18Х2Н4МА.

3. Обоснована форма ножей с применением топологической оптимизации, что позволило снизить массу изделий на 50% для прямых форм, на 45% для выпуклых и на 15% для геликоидной с воронкой при сохранении необходимых прочностных и жесткостных характеристик, соответствующих требованиям минимизации массы и технологической себестоимости с учетом особенностей работы геохода и его условий эксплуатации. Получена зависимость коэффициента прочности ножа геликоидной формы от процента уменьшения массы.

4. Установлено, что форма отвала влияет на эффективность использования материала, наименьший расход материалов при создании основных элементов, учитывая эксплуатационные требования к конструкции при создании геохода и особенности его работы, показан у выпуклой и полувыпуклой форм, где коэффициент использования материалов ($K_{им}$) при $r_c=3000$ мм для СЛС-технологий составляет 0,85-0,9, тогда как у прямой формы и геликоидной с воронкой значения ниже на 15-20%.

5. Обосновано, что увеличение радиуса затупления кромки ножа $r_{кр}$ с 2 до 5 мм приводит к росту силы сопротивления резанию $P_{o.св}$ примерно на 50-55%, а при минимальном радиусе затупления кромки $r_{зам}=2$ мм увеличение радиуса геохода значительно усиливает силу сопротивления $R_{u.o.св}$ ($>10\%$), в то время как при $r_{зам}=2$ мм рост силы резания практически не изменяется, а момент сопротивления $M_{u.o.св}$ увеличивается примерно на 50%, что свидетельствует о сложной нелинейной зависимости конструктивных решений ножевых органов от силовых параметров взаимодействия с породой.

6. Обосновано, что изменение радиуса кривизны $r_{кр}$ существенно влияет на силовые параметры взаимодействия геохода с породой: при увеличении $r_{кр}$ с 0,5 до 3,6 м проекция силы сопротивления $P_{o.св}$ возрастает на 114%, а момент сопротивления резанию $M_{u.o.св}$ увеличивается линейно для средних радиусов, что

свидетельствует о необходимости выбора конструкции с учетом этих параметров, увеличение шага внешнего движителя h_e приводит к росту силовых параметров системы, особенно для небольших радиусов геохода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в рамках которой автор, основываясь на проведенных исследованиях, выдвигает новые научно обоснованные технические решения, направленные на разработку новых методов создания НИО геоходов, которые вносят вклад в создание новой проходческой техники.

В результате выполнения работы решены связанные между собой задачи.

1. При выполнении задачи «Разработать и проанализировать схемные решения ножевых исполнительных органов геохода с учетом требований, предъявляемых к ним»:

– разработаны схемные решения НИО геохода и его элементов, которые обеспечивают такие требования, как эффективность работы НИО, условия эксплуатации, транспортируемость, в ходе анализа которых установлено, что наиболее полно отвечают требованиям следующие: прямая и полувыпуклая геликоидная форма ножей для компоновки ИО геохода, центральный нож в виде кольца и в виде режущего инструмента цилиндрической формы, схемное решение по компоновке НИО с учетом способов закрепления, в котором предполагается выполнить отвал и нож ИО с уступом, базирование происходит по данной поверхности, закрепление будет осуществляться также винтами со стороны заднего угла наклона ножа и с разделением режущей кромки ИО на определенные сегменты (ножи);

– установлено, что изменение количества лучей n напрямую сказывается на проекциях силовых параметров сопротивления грунта резанию и момента сопротивления, износ ножа ИО геохода нелинейно зависит от абразивности пород и длины пути резания, что подчеркивает необходимость учета эксплуатационных требований и критериев при разработке и производстве инструмента.

2. При выполнении задачи «Разработать математические модели формирования геликоидных форм ножей исполнительных органов геохода»:

– получены выражения, определяющие конструктивные параметры

выпуклой и полувыпуклой форм НИО геохода, такие как параметр h_c , характеризующий степень выпуклости ИО и его взаимодействие с породой; радиус кривизны R , определяющий изогнутую часть ИО; центральный угол образующего профиль ножа φ_{max} ; текущий угол образующего профиль ножа φ ; радиус геохода r_z ; расстояние от точки до оси вращения геохода h_z ;

– в результате моделирования движения точек режущих кромок ножа ИО была получена система уравнений движения этих точек, которые определяют траектории движения любой точки сечения ножа ИО прямой геликоидной формы.

3. В результате решения задачи «Обосновать рациональные параметры ножевых исполнительных органов геохода, включая конструктивные, силовые и технологические аспекты»:

– определено, что для создания основных элементов ИО литьем нужно использовать сталь 30ХГСА, при обработке давлением – сталь 18Х2Н4МА;

– обоснована форма ножей с применением топологической оптимизации, которая позволила снизить массу изделий на 50% для прямых форм, на 45% для выпуклых и на 15% для геликоидной с воронкой при сохранении необходимых прочностных и жесткостных характеристик с учетом особенностей работы геохода и его условий эксплуатации;

– обосновано, что изменение радиуса кривизны $r_{кр}$ существенно влияет на силовые параметры взаимодействия геохода с породой: при увеличении $r_{кр}$ с 0,5 до 3,6 м проекция силы сопротивления $P_{o.св}$ возрастает на 114%, а момент сопротивления резанию $M_{и.о.св}$ увеличивается линейно для средних радиусов, что свидетельствует о необходимости выбора конструкции с учетом этих параметров.

Основные направления дальнейших исследований будут включать:

1. Анализ напряженно-деформированного состояния НИО геохода.
2. Проведение экспериментальных исследований функционирования НИО на опытной модели геохода.
3. Обоснование рациональных параметров ИО при разрушении более крепких пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бегляков, В. Ю. Анализ конструкций корпусов применимых в качестве корпуса геохода // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов V Международной научно-практической конференции, Юрга, 22–23 мая 2014 г.: в 2-х т. Томск: Изд-во ТПУ, 2014. Т. 2. С. 277–279.
2. Аксенов, В. В., Хорешок, А. А., Бегляков, В. Ю. Концепция создания перспективного технологического уклада формирования (освоения) подземного пространства на базе опережающего развития новых подходов в строительной геотехнологии и геотехнике. Ч. 1: Предпосылки и основные положения. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2018. № 4(128). С. 105–114. DOI: <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2018-4-105-113>
3. Бегляков, В. Ю. Обоснование параметров поверхности взаимодействия исполнительного органа геохода с породой забоя: специальность 05.05.06 «Горные машины»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2012. 18 с.
4. Ермаков, А. Н. Обоснование параметров законтурных исполнительных органов геоходов для разрушения пород средней крепости: специальность 05.05.06 «Горные машины»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2016. 20 с.
5. Нестеров, В. И., Ананьев, К. А. Определение точки входа резца барабанного ИО геохода в контакт с породой // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 7. С. 45–48.
6. Аксенов, В. В., Садовец, В. Ю., Пашков, Д. А. Обоснование необходимости создания ИО геохода для разрушения пород малой крепости // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 6(118). С. 8–15.

7. 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.
8. Aksenov, V., Sadovets, V., Pashkov, D. The Influence of Parameters on the Generatrix of the Helicoid Form Guide of Geokhod Bar Working Body // E3S Web of Conferences : IInd International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment), Kemerovo, November 20–22, 2017. Vol. 21. Kemerovo: EDP Sciences, 2017. P. 49. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172103008>
9. Пашков, Д. Обоснование силовых и энергетических параметров исполнительных органов геохода для разрушения мягких пород: специальность 05.05.06 «Горные машины»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2021. 22 с.
10. Пашков, Д. А. Обоснование силовых и энергетических параметров исполнительных органов геохода для разрушения мягких пород // Развитие – 2021: научное электронное издание, Кемерово, 11–13 мая 2021 г. Кемерово: Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, 2021. С. 42–55. https://doi.org/10.53650/9785902305620_42
11. Ананьев, К. А. Создание исполнительного органа геохода для разрушения пород средней крепости: специальность 05.05.06 «Горные машины»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2016. 18 с.
12. Ефременков, А. Б. Разработка научных основ создания систем геохода: специальность 05.05.06 «Горные машины»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2016. 36 с.
13. Аксенов, В. В. Научные основы геовинчестерной технологии проведения горных выработок и создания винтоповоротных агрегатов:

специальность 05.05.06 «Горные машины»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2004. 34 с.

14. Садовец, В. Ю. Обоснование конструктивных и силовых параметров ножевых исполнительных органов геогодов: специальность 05.05.06 «Горные машины»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2007. 19 с.

15. Аксёнов, В. В., Хорешок, А. А., Ефременков, А. Б., Казанцев, А. А., Бегляков, В. Ю., Вальтер, А. В. Геогоды – основа создания нового геотехнологического инструментария для формирования подземного пространства и подземной робототехники // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: сборник трудов V Международной научно-практической конференции, Прокопьевск, 30–31 марта 2016 года. Прокопьевск: Филиал Кузбасского государственного технического университета в г. Прокопьевске, 2016. С. 277–288.

16. Аксенов, В. В., Вальтер, А. В. Специфика геогода как предмета производства // Научное обозрение. 2014. № 8-3. С. 945–950.

17. Вальтер, А. В. Факторы, обуславливающие погрешности поверхностей вращения крупногабаритных корпусов геогода // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 8 (126). С. 19–25.

18. Аксёнов, 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.

19. Вальтер, А. В., Аксёнов, В. В. Варианты обеспечения точности оболочек и собираемости корпусов геогода // Механики XXI века. 2015. № 14. С. 89–92.

20. Патент № 2418950 С1 Российская Федерация, МПК E21D 9/06. Проходческий щитовой агрегат (геогод): № 2009136822/03: заявл. 05.10.2009;

опубл. 20.05.2011 / Аксенов, В. В., Ефременков, А. Б., Тимофеев, В. Ю., Бегляков, В. Ю., Блащук, М. Ю.; заявитель Томский политехнический университет. 12 с.

21. Ефременков, А. Б., Казанцев, А. А., Блащук, М. Ю. Горные машины и оборудование. Введение в специальность: учебное пособие: в 2 ч. Ч. 1. 2-е изд. Томск : Томский политехнический университет, 2009. – 152 с.

22. Казаченко, Г. В., Кислов, Н. В., Басалай, Г. А. Горные машины и оборудование: электронный учебно-методический комплекс по дисциплине. Минск: Изд-во Белорусский национальный технический университет, 2014. 176 с.
URL: <https://thelib.net/1863122-jelektronnyj-uchebno-metodicheskij-kompleks-po-discipline-gornye-mashiny-i-oborudovanie.html?ysclid=meh3djgetf197210536>

23. Храпов, В. Г., Демешко, Е. А., Наумов, С. Н., Пирожкова, А. Н., Туренский, Н. Г. Тоннели и метрополитены: учебник для вузов. Москва: Транспорт, 1989. 383 с.

24. Филиппов, И. И. Тоннели, сооружаемые щитовым и специальными способами: учебное пособие. Москва: РГОТУПС, 2004. 212 с.

25. Садовец, В. Ю., Пашков, Д. А. Обоснование необходимости создания барового исполнительного органа геохода для разрушения пород крепостью до 1 по шкале профессора Протодяконова // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов Международной научно-практической конференции, Кемерово, 29–30 ноября 2017 года. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2017. С. 381–385.

26. Садовец, Р. В., Резанова, Е. В. Разработка методики построения ножа геликоидной формы исполнительного органа геохода в SOLIDWORKS // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Кемерово, 14–17 октября 2019 года. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2019. С. 143–147.

27. Козлов, И. В., Садовец, В. Ю. Садовец, Р. В. Разработка методики построения твердотельной модели тела ножевого исполнительного органа геохода

// Техника и технология горного дела. 2022. № 2(17). С. 67-86. DOI: 10.26730/2618-7434-2022-2-67-86

28. Садовец, Р. В., Резанова, Е. В. Методика построения твердотельной модели ножевого исполнительного органа геохода // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Кемерово, 14–17 октября 2019 года. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2019. С. 148–151.

29. Козлов, И. В. Выбор профиля сечения ножа исполнительного органа геохода в зависимости от угла резания // Россия молодая: сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 19–21 апреля 2022 года. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет, 2022. С. 420051–420056.

30. Балаба, В. И., Бикбулатов, И. К., Вышегородцева, Г. И., Гинзбург, Э. С., Кершенбаум, В. Я., Оганов, А. С. Буровой породоразрушающий инструмент: учебное пособие для вузов. Москва: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. 251 с.

31. Нескормных, В. В., Попова, М. С., Парахонько, Е. В. Разработка породоразрушающего инструмента с резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 2. С. 131–138. DOI: 10.18799/24131830/2020/2/2499

32. Ячейкин, А. И. Определение рациональных конструкций и параметров исполнительного органа проходческих щитов большого диаметра для горно-геологических условий шахт Метростроя СПб: специальность 05.05.06 «Горные машины»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. 22 с.

33. Султанов, Б. З., Шаммасов, Н. Х. Забойные буровые машины и инструмент: учебное пособие. Москва: Недра, 1976. 239 с.

34. Бохоева, Л. А., Пнев, А. Г. Выбор и обоснование оптимальной технологии изготовления лопасти вертолета из композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 5. С. 37–42.
35. Савчин, Д. А., Назаров, В. П. Анализ возможности изготовления деталей турбонасосных агрегатов методами аддитивных технологий // Решетневские чтения: материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, 10–12 ноября 2021 года: в 2-х ч. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2021. С. 181–182.
36. Лысянников, А. В., Желудкевич, Р. Б., Малянов, В. В., Кайзер, Ю. Ф., Лысянникова, Н. Н., Серебrenикова, Ю. Г. Анализ современного состояния и развития конструкций ножей отвалов дорожных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 1. С. 121–130.
37. Сериков, Д. Ю. Анализ конструкций и технологий изготовления твердосплавного вооружения шарошечных буровых долот // СФЕРА. Нефть и газ: всероссийский электронный и печатный журнал. 2017. № 1. С. 30–35. URL: <https://сфранефтьгаз.рф/gubkin1-2017-1/> (Дата обращения: 05.05.2025).
38. Кузнецов, М. А., Нгуен, Т.У.Н Использование методов ELECTRE в задачах принятия решения // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2010. № 2(10). С. 40–46.
39. Нефедов, А. С. Сравнительный анализ метода ELECTRE III и метода анализа иерархий при решении многокритериальных задач // Труды Братского государственного университета. Серия. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 2. С. 9–15.
40. Akram, M., Ilyas, F., Garg, H. ELECTRE-II method for group decision-making in Pythagorean fuzzy environment // Applied Intelligence. 2021. N 51(7). P. 8701–8719. DOI: 10.1007/s10489-021-02200-0

41. Терелянский, П. В., Кузнецов, С. Ю. Методика ELECTRE и автоматизация ранжирования альтернатив // E-Management. 2022. Т. 5, № 3. С. 26–37. DOI: 10.26425/2658-3445-2022-5-3-26-37
42. Amirghodsi, S., Naeini, A. B., Makui, A. An Integrated Delphi-DEMATEL-ELECTRE Method on Gray Numbers to Rank Technology Providers // IEEE Transactions on Engineering Management. 2022. Vol. 69, N 4. P. 1348–1364. DOI: 10.1109/TEM.2020.2980127
43. Абдигалиев, М., Алиев, С. Принципы выбора параметров землеройных рабочих органов // Механика и технологии. 2016. № 3(53). С. 6–15.
44. Денщиков, С. Л., Янковский, Л. В. Модернизация отвала бульдозера для разработки прочных грунтов // Высшая школа: научные исследования: материалы Межвузовского международного конгресса, Москва, 27 мая 2021 года. Т. 1. Москва: Инфинити, 2021. С. 114–120.
45. Адамов, Е. А., Вахрушев, С. И. Повышение производительности бульдозера путем совершенствования отвала с ножами и рыхлительного оборудования // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2020. Т. 2. С. 450–455.
46. Романович, А. А., Романович, М. А., Вискребенцев, Е. И., Апухтина, И. В. Исследование эффективного профиля ножей отвала бульдозера // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвузовский сборник статей / под редакцией В.С. Богданова. Белгород: Белгородский государственный технологический университет, 2021. Т. XX. С. 163–168.
47. Лесковец, И. В. Цифровой двойник рабочего оборудования бульдозера // Международный журнал инженерных исследований = Global Journal of Researches in Engineering. 2020. Т. 20, № 4-J. С. 3.
48. Аксенов, В. В., Садовец, В. Ю., Пашков, Д. А., Захаров, А. Ю. Влияние формы режущей кромки на силу резания ножевым исполнительным органом // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 1(147). С. 30–36. – DOI: 10.26730/1816-4528-2020-1-30-36

49. Gerasimov, V., Nizhegorodtsev, E., Voronov, E. The effect made by the interaction between rock and fibrous polymeric materials on the geotechnological processes // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2021. № 1. Р. 27–35. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-27-35
50. Альтшуль, Г. М., Гуськов, А. М., Пановко, Г. Я. Моделирование взаимодействия обрабатываемой породы с вибрационной щековой дробилкой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 1. С. 33–42. – DOI: 10.31857/S0235711921010053.
51. Ветров, Ю. А., Баладинский, В. Л. Машины для специальных земляных работ. Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1980. 308 с.
52. Ветров, Ю. А. Резание грунтов землеройными машинами. Москва: Машиностроение, 1971. 360 с.
53. Ветров Ю. А. Расчет сил резания и копания грунтов. Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1985. 251 с.
54. Барон, Л. И., Глатман, Л. Б., Губенков, Е. К. Разрушение горных пород проходческими комбайнами: в 4-х т. Т.1: Научно-методические основы. Разрушение резцовым инструментом. Москва: Наука, 1968. 216 с.
55. Барон, Л. И., Кузнецов, А. В. Абразивность горных пород при добычании. Москва: Изд-во Академии наук СССР, 1961. 182 с.
56. Пашков, Д. А., Садовец, В. Ю. Влияние геликоидности исполнительного органа на силовые параметры взаимодействия его с породой забоя // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, Прокопьевск, 13–14 апреля 2022 года. Прокопьевск: Филиал Кузбасского государственного технического университета, 2022. С. 58–62.
57. Садовец, В. Ю., Садовец, Р. В., Резанова, Е. В. Разработка параметрической модели контура режущей кромки ножа исполнительного органа геохода // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2023. № 1. С. 16–24. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-16-24

58. Аксенов, В. В., Бегляков, В. Ю., Садовец, В. Ю., Пашков, Д. А., Осипов, Р. С., Измайлов, И. Р. Модель взаимодействия геохода и его систем с геосредой. Необходимость переформатирования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия. Технические науки. 2023. № 1(17). С. 19–28. DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-19-28

59. Родин, С. П., Урмаев, М. С. Определение параметров преобразования геодезических прямоугольных пространственных координат при произвольных значениях параметров // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 1998. № 4-5. С. 3–14

60. Соловьев, Н. В. Методы коррекции пространственных искажений изображений плоских объектов в условиях действия полной аффинной группы преобразований // Информационно-управляющие системы. 2003. № 6(7). С. 7–11.

61. Живаго, Э. Я., Фаренбрух, Д. С., Борисова, Л. Б. Постановка задачи кинематического анализа механизмов, звенья которых связаны одноконттактными кинематическими парами // МашиноСтроение. 2006. № 16. С. 71–77.

62. Юнусов, Ф. С., Абдреев, М. М. Методика аналитического моделирования процесса формообразования винтовых поверхностей дисковым инструментом // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2004. № 4. С. 10–12.

63. Aksenov, V., Sadovets, V., Rezanova, E., Pashkov, D. Impact of the number of blades of the geokhod cutting body on cutting forces // E3S Web of conferences: The 1st Scientific Practical Conference “International Innovative Mining Symposium” (in memory of Prof. Vladimir Pronoza), Kemerovo, April 24–26, 2017. Kemerovo: EDP Sciences, 2017. Vol. 15. P. 03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20171503015

64. Аксенов, В. В., Садовец, В. Ю. Синтез технических решений исполнительных органов геоходов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2006. № 6–1(57). С. 64–68.

65. Аксенов, В. В., Садовец, В. Ю. Синтез технических решений ножевого исполнительного модуля геохода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2006. № 6–2(58). С. 33–37.

66. СП 122.13330.2023. Свод правил. Тоннели железнодорожные и автодорожные: актуализированная редакция СНиП 32-04-97: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации 20.10.2023 г. № 760/пр: введен 21.11.2023. Москва: Федеральное агентство по техническому регулированию метрологии (Росстандарт), 2013 10 с.

67. СП 249.1325800.2016. Свод правил. Коммуникации подземные. Проектирование и строительство закрытым и открытым: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 08.07.2016 г. № 485/пр: введен 01.10.2016. – Москва: Федеральное агентство по техническому регулированию метрологии (Росстандарт), 2016 78 с.

68. Цехмистро, И. С. Теоретические основы производства деталей и сборки машин: учебное пособие. Днепропетровск: ГИПОпром, 2005. 220 с.

69. Гевко, Б. В., Пилипец, М. И., Васылькив, В. В., Радык, Д. Л. Технологические основы формообразования разнопрофильных винтовых заготовок: монография. Тернополь: Изд-во ТДТУ им. И. Пулюя, 2009. 457 с.

70. Филиппов, М. А., Бараз, В. Р., Гервасьев, М. А., Розенбаум, М. М. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении: учебное пособие: в 2 т. Т. I: Стали и чугуны. 2-е изд., испр. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. 232 с.

71. Ушаков, В. Г., Филатов, В. И., Ибрагимов, Х. М. Выбор марки стали и режима термической обработки деталей машин: учебное пособие для студентов-заочников машиностроительных специальностей. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. 23 с.

72. Huang, H. Discrete element modeling of tool-rock interaction. University of Minnesota, 2000. 262 p.

73. Gorodilov, L. V., Efimov, V. P., Kudryavtsev, V. G. Modeling the striking head-impact tool-rock mass interaction // Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49, N 4. P. 618-624. DOI: 10.1134/S1062739149040138

74. Крапивин, М. Г., Раков, И. Я., Сысоев, Н. И. Горные инструменты. Москва: Недра, 1990. 256 с.

75. Chen, W., Zhang, L. Cemented Carbides – An Outstanding Class of Refractory Based Alloys // Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys. Elsevier, 2022. P. 383–393.
76. Binner, J., Murthy, T.S.R. Structural and Thermostructural Ceramics // Materials of Technical Ceramics and Glasses. 2021. № 1970. P. 3–24.
77. Barrena, M. I., Gómez de Salazar, J. M., Matesanz, L. Interfacial microstructure and mechanical strength of WC–Co/90MnCrV8 cold work tool steel diffusion bonded joint with Cu/Ni electroplated interlayer // Materials & Design. 2010. Vol. 31, № 7. P. 3389–3394. DOI:10.1016/j.matdes.2010.01.050
78. Cheniti, B., Badji, R., Djilali, A., Miroud, D. Effect of brazing current on microstructure and mechanical behavior of WC-Co/AISI 1020 steel TIG brazed joint // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2017. Vol. 64. P. 210–218. DOI:10.1016/j.ijrmhm.2016.11.004
79. Погоньшев, В. А., Миненко, А. А. Моделирование процесса абразивного изнашивания // Проблемы энергообеспечения, информатизации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК: сборник материалов международной научно-практической конференции, Брянск, 21–23 сентября 2011 года. Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2011. С. 119–124.
80. Садовец, В. Ю., Резанова, Е. В., Садовец, Р. В. Разработка технологического процесса изготовления ножа исполнительного органа геолода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 1 (149). С. 23–34. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-1-23–34
81. Каблов, Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 7–17.
82. Разуваев, Е. И., Моисеев, Н. В., Капитаненко, Д. В., Бубнов, М. В. Современные технологии обработки металлов давлением // Труды Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ). 2015. № 2. С. 15–19.

83. Медведев, О. А. Повышение объективности выбора заготовок деталей // Известия МГТУ МАМИ. 2014. Т. 8, № 1-2. С. 12–16. DOI: 10.17816/2074-0530-67623
84. Эварт, Т. Е., Пучков, В. П., Схиртладзе, А. Г., Прис, Н. М. Моделирование выбора рационального способа изготовления заготовок машиностроительных деталей // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2017. №2 (41). С. 62–67.
85. Unit 3D Print: интернет-портал. URL: <https://unit3dprint.ru/> (Дата обращения: 03.03.2024).
86. Кравец, Д. В. SLM-технология: анализ опорных структур изделий в зависимости от материала // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сборник статей по материалам СП студенческой международной научно-практической конференции, Новосибирск, 10 июня 2021 года. Новосибирск: Сибирская академическая книга, 2021. Т. 6 (101). С. 145–151.
87. Вэнь, Ч., Децзюнь, К. Характеристики поверхности и высокотемпературный износ нитридного слоя, полученного в плазме на стали H13 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2019. № 11(773). С. 43–49.
88. Чжэн, Ц., Мэй, Ш., Чжи, С., Гурьев, А. М., Фань, Ю., Лыгденов, Б.Д., Гурьев, М. А. (2022). Исследование влияния борирования с редкоземельными элементами на свойства штамповой стали H13: 10.25712/astu.1811-1416.2022.03.011 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. № 19(3). С. 384–393. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.011
89. Kattire, P., Bhawar, V., S. Thakare, S., R. Singh, R. Experimental characterization of laser cladding of Stellite 21 on H13 tool steel // Electrotechnica and Electronica. 2018. Vol. 53, N 9–10. P. 248–254.
90. Гуанхуа, Ю., Ксиминь, Х., Янцинъ, В., Ксингуо, Ц., Минь, Я., Жуоминь, Ч., Кань, Ц. Влияние термической обработки на механические свойства стали H13 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 8(662). С. 46–48.

91. Ли, Ц., Ли, Ц., Ван, Л., Чжу, Ц. Исследование влияния малых добавок Mg на карбиды в штамповой стали H13 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2016. № 6(732). С. 20–24.

92. Дубров, А. В., Мирзаде, Ф. Х., Дубров, В. Д., Панченко, В. Я. Теплоперенос и термокапиллярная конвекция в процессе лазерного нанесения металлических порошков для аддитивных технологий // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2018. № 1. С. 65–75. DOI: 10.7868/S0207352818010110

93. Шаров, А. М., Шафранов, А. В. Влияние состояния подложки на качество лазерной газопорошковой наплавки при восстановлении цилиндрических поверхностей // *Химия. Экология. Урбанистика: материалы Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Пермь, 17–19 апреля 2024 г.: в 4 т. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2024. Т. 4. С. 200–203.*

94. Мжельский, М. С., Шершуков, Д. А. Анализ растровых изображений распределения материала в результате топологической оптимизации // *Мир науки без границ: материалы 9-й Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных с международным участием, Тамбов, 11 февраля 2022 года. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2022. С. 214–218.*

95. Самаркин, А. И., Самаркина, Е. И., Дмитриев, С. И., Евгеньева, Е. А. Оптимизация геометрии режущего инструмента путем снижения его массы методами топологической оптимизации // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2023. № 2. С. 82–84.

96. Гаркуша, А. В. Применение топологической оптимизации при проектировании деталей // *Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы (Молодой инженер): материалы XXVIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 24–26 апреля 2024 года. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 68–72.*

97. Анциферов, С. И., Карачевцева, А. В., Сычев, Е. А., Карпачев, Д. В., Запара, У. И. Инструменты топологической оптимизации изделий машиностроения // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвузовский сборник статей. Белгород: Белгородский государственный технологический университет, 2023. С. 15–20.

98. Зубарев, А. М., Чегодаева, П. Д. Топологическая оптимизация в программном комплексе SOLIDWORKS // Интернаука: электронный научный журнал. 2025. № 3(367). С. 32–34. URL: <https://internauka.org/journal/science/internauka/367> (дата обращения: 19.08.2025).

99. Левенков, Я. Ю., Лебедев, Д. Р. Использование методов топологической оптимизации на ранних стадиях проектирования несущей системы снегохода // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 4. С. 21–29.

100. Голунов, А. В., Щеглов, С. А., Варепо, Л. Г., Голунова, А. С., Трапезникова, О. В. Адаптация технологии 3И-печати и методов топологической оптимизации для изготовления зажима трафаретной формы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 8. С. 490–497.

101. Котов, В. В., Котова, В. В., Матросов, А. А., Доровская, В. К., Скачедуб, А. В. Топологическая оптимизация подъемной стрелы ковша фронтального погрузчика // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, Феодосия, 19–22 мая 2024 года. Керчь: Керченский государственный морской технологический университет, 2024. С. 31–34.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2024615234

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2024615234 Дата регистрации: 05.03.2024 Номер и дата поступления заявки: 2024613603 21.02.2024 Дата публикации и номер бюллетеня: 05.03.2024 Бюл. № 3 Контактные реквизиты: нет	Автор(ы): Нозирзода Шодмон Салохидин (RU) Правообладатель(и): ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "ИРФОН ИНЖИНИРИНГ" (RU)
--	---

Название программы для ЭВМ:

Программа для реализации математической модели тела ножа исполнительного органа проходческого агрегата

Реферат:

Программа предназначена для реализации математической модели тела ножа исполнительного органа проходческого агрегата. Математическая модель тела ножа исполнительного органа проходческого агрегата описывается системами уравнений для определения координат точек сечения ножа. Программу можно применить при изготовлении тела ножа исполнительного органа проходческого агрегата. Программа позволяет определять координаты точек поперечного сечения ножа по осям X, Y и Z вдоль длины исполнительного органа проходческого агрегата. Координаты точек описываются сложной формой тела ножа исполнительного органа, которая является геликоидной и имеет угол закручивания вдоль оси Z. Тип ЭВМ: ПК, в том числе многопроцессорные вычислительные кластеры (суперкомпьютеры); ОС: Windows XP/Vista/7/8/10/Linux.

Язык программирования: MATLAB

Объем программы для ЭВМ: 8 КБ