Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Смоленский Максим Павлович

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Юнгмейстер Д.А.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..……..……4

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКЦИЙ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ВЕДЕНИЯ ДОБЫЧИ ПРИДОННЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ……..…..……..…10

1.1 Классификация глубоководных ресурсов морского дна……..10

1.2 Критический анализ концепций освоения глубоководных ресурсов……...…..….11

1.3 Конструкция систем транспортировки собранных ЖМК……...…24

1.4 Конструкции придонных аппаратов……..…….…...29

1.5 Параметрический анализ устройств для добычи глубоководных полезных ископаемых……..……...…32

1.6 Анализ методик расчетов основных составляющих глубоководного комплекса добычи ЖМК……...34

1.7 Выводы по главе 1…….……...…….…...37

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ДОБЫЧИ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ…….……...39

2.1 Анализ способов перемещения подводных аппаратов по дну……..…….39

2.2 Обоснование параметров кабель-троса…….50

2.3 Расчет параметров гидроцилиндров и определение схемы шагания…….52

2.4 Расчет подруливающих устройств……60

2.5 Анализ производительности добычного комплекса……63

2.6 Выводы по главе 2…….……..…71

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ АГРЕГАТОВ ШАГАЮЩЕГО ТИПА ……....73

3.1 Задачи экспериментального исследования……73

3.2 Разработка методик, число серий, число опытов……...73

3.3 Описание экспериментальной установки……..74

3.4 Результаты экспериментального исследования……76
3.5 Анализ напряжений в узлах ПС в критический момент……..82
3.6 Выводы по главе 3……86
ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР СХЕМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО СБОРА ТПИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЗАЛЕГАНИЯ ……88
4.1 Конструкция добычного комплекса для рассредоточенных по дну ТПИ …….88
4.2 Подъемная установка для глубоководной добычи твердых полезных ископаемых……96
4.3 Параметры опытного образца комплекса для глубоководной добычи полезных ископаемых……100
4.4 Расчет производительности добычного комплекса……112
4.5 Выводы по главе 4……..119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…… 120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……122
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение……..….136
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения……..137
ПРИЛОЖЕНИЕ В Входные данные для расчетов……...……138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований

Интерес к ресурсам Мирового Океана, таким как железомарганцевые конкреции (ЖМК) связан с растущими потребностями мировой промышленности в редких и цветных металлах. ЖМК имеют глубину залегания от 4000 метров до 6000 метров. Данный вид придонного сырья рассредоточен по морскому дну в виде сферических отложений, диаметром от 5 см до 20 см [75]. Учитывая плотность распределения конкреций на одном квадратном метре, можно утверждать, что с участка 700х700 метров можно поднять до 5880 тонн ЖМК [56]. В составе ЖМК имеются такие ценные элементы, как никель, кобальт, медь и марганец, что позволяет рассматривать этот глубоководный ресурс, как перспективный источник стратегически важных элементов, необходимых для производства аккумуляторов, высокотехнологичной электроники и использования в сталелитейной промышленности. Существенной проблемой разработки концепции добычи ЖМК является глубина залегания конкреций, объективные трудности применения гидротранспорта с обитающими на ней морскими организмами. При этом известны средства сбора и подъема на основе сверхпрочных канатов, однако, конструкции и параметры сверхпрочного кабель-троса требуют исследования для обоснования типа несущей основы, например, подбор типа арамида или кевлара [54-55].

Исследуемая проблема актуальна по той причине, что современные концепции освоения морских полезных ископаемых не отвечают требованиям международных организаций по производительности и нагрузке на окружающую среду. В частности, концепции добычи DEME, TMC, Blue Nodules и другие используют в качестве ходовой части сборщиков гусеничный механизм [57], что в процессе добычи при перемещении агрегата приведет к разрыхлению грунта, созданию замутненности и таким образом навредит целостности дна. За контроль над внедряемыми технологиями и их экспертизе отвечает Международный орган по морскому дну (МОМД), одним из главных приоритетов которого является сохранение целостности придонной биоты.

В связи с вышесказанным необходима разработка эффективных установок, позволяющих осуществлять добычу ЖМК без активного влияния на придонную флору и фауну.

Степень разработанности темы исследования

По теме исследования на сегодняшний день есть ряд патентов и предложений, запатентована шагающая установка. Имеется необходимость в проведении лабораторных исследований и расчета производительности добычного комплекса, в котором используется шагающая установка. Проблемами глубоководной добычи конкреций занимались и занимаются как отечественные, так и зарубежные ученые: Александров В.И., Бубис Ю.В., Вильмис А.Л., Добрецов В.Д., Маховиков Б.С., Медведков В.И., Нурок Г.А., Сержан С.Л., Тарасов Ю.Д., Черкашёв Г.А., Шелковников И.Г., Юнгмейстер Д.А., Ястребов В.С., Russel S. Debney, Yang Yong, Gaowen He. Существенный вклад в развитие отрасли внес международный консорциум Nautilus Minerals.

Однако обоснование рациональных конструктивных схем и параметров устройств для добычи ЖМК, обеспечивающих местную транспортировку собранного материала с минимальным воздействием на донную поверхность, сдерживается отсутствием достаточного объема теоретических и экспериментальных исследований по выявлению закономерностей процессов шагания ходовой части в виде рукоятей, в частности, эффекта воздействия сил гидродинамического сопротивления на перемещающийся подводный спредер (ПС).

Предмет исследования – устройства для горизонтального и вертикального перемещения добычного оборудования комплекса для сбора ЖМК.

Объект исследования – процесс передвижения устройств в составе комплекса добычи ЖМК с учетом их грузоподъемности, во взаимосвязи с используемым для спускоподъемных операций канатом.

Цель работы - повышение производительности добычного комплекса железомарганцевых конкреций при использовании канатной системы для

спускоподъемных операций и вспомогательного оборудования для смены участка добычи путем местной транспортировки груза и добычной станции.

Идея работы заключается в уменьшении времени цикла добычи железомарганцевых конкреций при сокращении времени на местную транспортировку груза, весом, определяемым характеристиками каната для спускоподъемных операций, и вспомогательных устройств в составе комплекса.

Научная новизна работы

1. Разработан алгоритм передвижения ПС шагающего типа с рукоятями-манипуляторами, при использовании гидроцилиндров в качестве приводов, для добычного комплекса ЖМК;

2. Предложено использование в составе добычного комплекса ЖМК кабель-троса с грузонесущей арамидной оплеткой на основе проведенных теоретических расчетов его грузоподъемности, учитывающих модуль упругости материала, вес каната и бункера в воде, а также динамической составляющей при начальном рывке;

3. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден коэффициент гидродинамического сопротивления формы рукоятей-манипуляторов ПС добычного комплекса ЖМК и установлено предпочтительное миделево сечение конструкции рукоятей;

4. Разработан алгоритм смены участка добычи ЖМК, при использовании в качестве устройства местной транспортировки – ПС, на основе которой установлена функциональная зависимость производительности комплекса от плотности распределения конкреций.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует пункту п.14. «Критерии и технологические требования при создании новых и совершенствования применяемых горных машин с учетом особенностей условий их эксплуатации при разработке месторождений твердых полезных ископаемых» области исследований паспорта специальности 2.8.8 Геотехнология, горные машины.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1) Разработана методика определения основных параметров ПС и транспортирующей установки на основе сверх прочного кабель-троса в составе глубоководного комплекса добычи ЖМК. Установлено, что придание гидродинамической формы рукоятям-манипуляторам ходовой части подводного спредера влияет на скорость смены участка добычи и на производительность в целом.

2) Разработана и запатентована конструкция добычного комплекса ЖМК, применение которой позволит добывать ТПИ без активного влияния на придонную флору и фауну, не теряя при этом в производительности добычи, при использовании канатной установки с кабель-тросами для спускоподъемных операций и электроснабжения, автономной станции с мини-роботами сборщиками и ПС шагающего типа для смены участка. Конструкция защищена патентом РФ на изобретение №27882227 от 17.01.2023 (Приложение А).

3) Разработана и запатентована конструкция скипового подъемника добываемых ЖМК, применение которой позволит поднимать два бункера с собранными ТПИ реверсивным способом, тем самым обеспечивая уменьшение временных затрат на ожидание спускаемого бункера. Конструкция защищена заявкой на патент № 2024131950/03 от 24.10.2024.

4) Разработанная методика определения времени цикла и производительности добычи ЖМК при использовании местной транспортировки бункеров подводным спредером принята к внедрению ООО «ГИКО» для дальнейшего создания опытного образца добычного комплекса (акт внедрения от 05.06.2025) (Приложение Б).

Методология и методы исследования

Для достижения поставленной цели и решения определённых задач применён комплексный метод исследований, включающий системный анализ, обобщение результатов существующих разработок, теоретический анализ процесса и экспериментальные исследования для определения показателей ПС для выполнения операций на дне.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Время цикла шагания подводного спредера добычного комплекса достигает минимальных значений при выполнении лап с эллипсоидным сечением, с отверстиями, что позволяет уменьшить время цикла добычи, при этом позиционирование спредера в заданную точку дна может осуществляться винтовыми подруливающими движителями с диаметром винта 0,3 м и мощностью двигателя 5 кВт.

2. Зависимость производительности канатного подъемного устройства добычного комплекса от скорости подъема выражается нелинейной квадратичной функцией, при этом максимальный вес поднимаемого контейнера не должен превышать 1000 кН, кабель-трос должен выполняться из арамида и иметь диаметр не более 0.06 м.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность научных положений основа на использовании апробированных математических методов, удовлетворительной сходимости, а также воспроизводимости результатов экспериментальных исследований на стенде с применением современных средств измерений и методов исследований.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на семинарах и конференциях: V Всероссийская научно-практическая конференция НИЦ МС «Научный потенциал молодежи и технический прогресс» (2022г), XI форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного Государства БНТУ (2022г), Международная конференция «Полезные ископаемые Мирового океана» ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (2023г, 2024г), XXII Международная научно-техническая конференция Чтения памяти В.Р. Кубачека ФГБОУ «УГГУ» (2024г).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; в анализе зарубежной и отечественной литературы по теме исследования; в разработке алгоритмов, позволяющих рассчитать пооперационные затраты времени цикла шагания, в определении параметров узлов ПС, оценке влияния гидродинамической силы при расчете

элементов ходовой и рабочей части спредера шагающего типа, в обработке и интерпретации экспериментальных данных; в обосновании и выборе схемного технического решения подводного оборудования для сбора ЖМК при различных условий залегания; в подготовке публикаций, отражающих основные положения и результаты диссертационной работы.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах (пункты списка литературы № 95, 96, 97, 98), в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получен 1 патент на изобретение (Приложение А).

Структура работы. Диссертация изложена на 141 страницах машинописного текста, состоит из введения, 4-х глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 125 источников, перечня условных обозначений и 3 приложений, содержит 47 рисунков и 20 таблиц.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКЦИЙ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ВЕДЕНИЯ ДОБЫЧИ ПРИДОННЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

1.1 Классификация глубоководных ресурсов морского дна

На сегодняшний день проблема освоения глубоководных ресурсов морского дня является актуальной по ряду причин [3–5]. Первоочередная причина состоит в перспективе истощения земных месторождений кобальта, марганца и других ценных металлов, используемых во многих отраслях промышленности [10–11]. В Мировом океане среди глубоководных полезных ископаемых заслуживают внимание три вида твердых полезных ископаемых (ТПИ): железомарганцевые конкреции (ЖМК), полиметаллические сульфиды (ГПС) и кобальтоносные марганцевые корки (КМК). В таблице 1.1 представлена классификация глубоководных ТПИ.

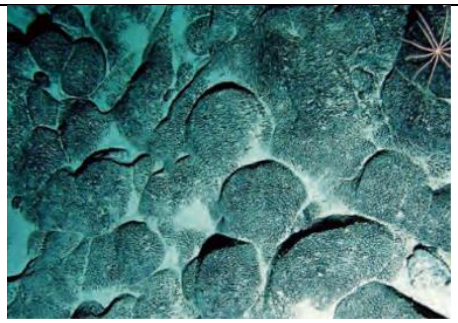
КМК имеют глубину залегания от 1000 метров до 3000 метров. Располагаются эти глубоководные полезные ископаемые либо отдельно друг от друга в виде подводных гор – гайотов, либо группой вулканотектонических массивов [7-8]. Под гайотами подразумеваются горы абразионного происхождения, поднимающиеся со дна, с крутыми склонами и плоской вершиной. Концентрация КМК на дне внушительна: на одно рудное поле с несколькими участками приходится до 40 млн. т. сухой руды.

ЖМК имеют глубину залегания от 4000 метров до 6000 метров. Данный вид придонного сырья рассредоточен по морскому дну в виде сферических отложений, диаметром от 5 см до 20 см [18-19]. Учитывая плотность распределения конкреций на одном квадратном метре, можно утверждать, что с участка 700х700 метров можно поднять до 5880 тонн ЖМК [29-30].

ГПС имеют глубину залегания 1000 – 2500 метров. ГПС включают медные и цинковые руды с высоким содержанием золота и других редких металлов. Они локализованы, преимущественно, в Атлантическом и Тихом океанах. Среднее содержание меди на суше — около 1%, в глубоководных же полиметаллических

сульфидах оно может составлять в среднем 2,5-10% (максимально — 30%). В тонне руды также содержится 4-10 г золота (максимально — 17 г на тонну) [21-22].

Таблица 1.1 – Классификация глубоководных ТПИ (составлено автором)

Тип ископаемого	Внешний вид	Место обитания	Глубина залегания
ЖМК		располагаются на абиссальных океанических равнинах	4000 – 6000 метров
КМК		склоны подводных гор и гайотов	1000 – 3000 метров
ГПС		место возникновения гидротермальных процессов	1000 – 2500 метров

Согласно данным проведенных исследовательских экспедиций установлены характеристики кобальтомарганцевых корок: удельная плотность 1,6–2,17 г/см^3, значение пористости 43–74 %, а пределы прочности на сжатие и растяжение соответственно 0,5–16,8 МПа и 0,1–2,3 Мпа [32-33]. Железомарганцевые конкреции обладают малой прочностью 100 кПа и плотностью 1,5–2 г/см^3 [12–13].

1.2 Критический анализ концепций освоения глубоководных ресурсов

Разработка научно обоснованного технического решения для реализации эффективного процесса добычи ЖМК с минимальным воздействием на поверхность

грунта, расположенных на больших глубинах, вида и типа его исполнительных органов, является актуальной задачей, требующей научного обоснования параметров механизма перемещения устройства в составе комплекса добычи ЖМК, а также параметров и конструкции средств сбора ЖМК [6, 9].

Представлен анализ зарубежных и российских концепций добычи ЖМК, отдельное внимание уделяется узлам сбора, ходовым частям сборщиков, системам подъема и техническим характеристикам добычных устройств [27, 31].

Зарубежные концепции

1. Dredging Environment and Marine Engineering (DEME), Бельгия.

Ходовая часть: гусеницы.

Исполнительный орган собирающего устройства PATANIA II компании DEME состоит из гидравлического подъемника и механического конвейера (рисунок 1.1). Для разрыхления донного грунта и осадков используются струи воды. После этого происходит отделение поперечными пластинами полиметаллических конкреций от осадка без механических контактов. Вращающийся ребристый скребок извлекает из осадочного шлейфа только ЖМК, после чего транспортирует их в коллектор.

Транспортировка конкреций в рамках данной концепции осуществляется гидротранспортом: используется гибкий трубный став с подключенными одноступенчатыми центробежными насосами.

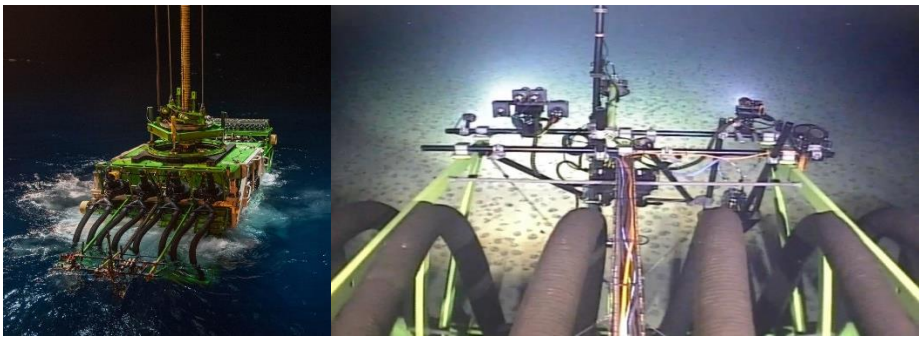


Рисунок 1.1 – Испытания глубоководного сборщика PATANIA II [59]

Весной 2021 года в зоне Кларион-Клиппертон на глубине 4500 м были проведены успешные испытания подводного аппарата для сбора ЖМК PATANIA II. Коммерциализация проекта планируется осуществить в 2028 году после завершения экологической экспертизы и утверждении отчетов о воздействии на придонную биоту.

2. The Metals company (TMC), Канада, Нидерланды.

Ходовая часть: гусеницы.

Концепция TMC представляет собой комплекс, в состав которого входят: сборщик, вертикальный гидротранспорт – система эрлифта, судно поддержки производства и погрузочных барж. Сборщик этой концепции есть ни что иное, как гидравлический коллектор, установленный на гусеничной ходовой части (рисунок 1.2). Исполнительным органом для сбора конкреций выступают 6 струйных водяных насосов: 4 – для сбора, 2 – для транспортировки. Гидротранспорт представляет собой стальную трубу, по которой конкреции будут передаваться на поверхность с помощью эрлифта [61]. Гидротранспорт будет состоять из трех основных секций. Нижняя секция будет переносить двухфазную суспензию конкреций и воды из коллекторов в точку закачки эрлифта. В средней секции будет подаваться трехфазная смесь суспензии и воздуха. Эта секция также будет включать две вспомогательные трубы: одну для подачи сжатого воздуха для системы эрлифта и одну для возврата воды, полученной в результате обезвоживания суспензии, в точку подводного сброса. Верхняя секция будет иметь больший диаметр, чтобы учесть расширение воздуха в системе воздушного лифта.

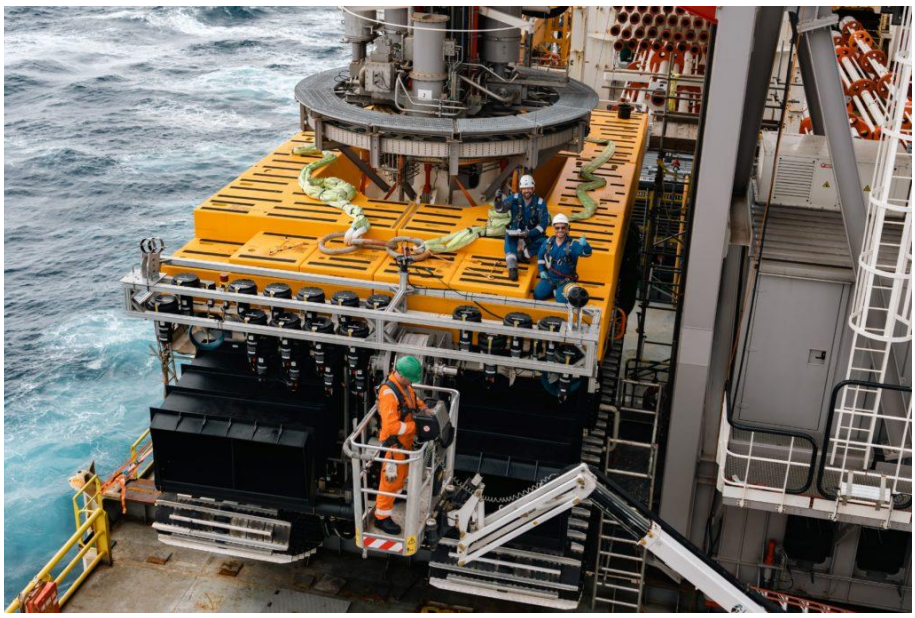


Рисунок 1.2 – Глубоководный сборщик The Metals company [59]

В ноябре 2022 года завершились первые с 1970-х годов успешные испытания комплексной пилотной добычной системы в зоне Кларион-Клиппертон. Было собрано

4500 тонн влажных конкреций и поднято с глубины 4000 метров. Производительность комплекса составила 86,4 т/ч. В планах у TMC была подача заявки на контракт по разработке конкреций во второй половине 2023 года.

3. Blue Nodules, Royal IHC, Норвегия.

Ходовая часть: гусеницы.

Концепция добычи ЖМК состоит из следующих подсистем:

- гусеничные коллекторы проводят фактические работы по добыче на морском дне (рисунок 1.3). Добытые конкреции гидротранспортом подаются через систему с гибкой трубой;

- гибкая труба подает конкреции в буферный узел, служащий местом временного хранения, если добыча на морском дне ведется с более высокой скоростью, чем может быть проведена с помощью гидротранспорта.

- из буфера конкреции транспортируются воздушным транспортом на верхний уровень через вертикальную трубу, снабженную гибкими соединениями.

Рисунок 1.3 – Гусеничный сборщик-коллектор Apollo II [59]

Исполнительный орган гусеничного сборщика-коллектора Apollo II выполнен в виде двойных форсунок и перегородок, сопла Коанда, транспортного канала, а также выходной решетки для отделения осадков от конкреций.

Полевые испытания Apollo II были проведены в августе 2022 года. В окончательном варианте комплекса запланировано производство полноценного добычного агрегата с коллектором шириной 16 метров для сбора преимущественно самих конкреций, оставляя в идеале осадочный слой на месте.

4. NIOT, Индия

Ходовая часть: гусеницы.

Индийская концепция NIOT рассматривает использование комплекса, в составе которого: многоступенчатая система гидротранспорта с центробежными насосами и гусеничного сборщика. Сборщик представляет собой гусеничное транспортное средство с головкой механического шнека (рисунок 1.4), ковшового подъемника для транспортировки конкреций в бункер, дробилки для калибровки конкреций и насоса для транспортировки смеси конкреций и воды в модуль трубного става [62]. Коллекторная головка имеет два шнековых конвейера для захвата разбросанных конкреций, лежащих на морском дне, и для их сбора под подъемником, чтобы их можно было зачерпнуть в дробилку через бункер. Дробилка имеет два вращающихся барабана, в которых конкреции измельчаются до 10 мм и менее. Исполнительным органом для сбора являются грабли, использующие принцип просеивания для черпания конкреций с морского дна.

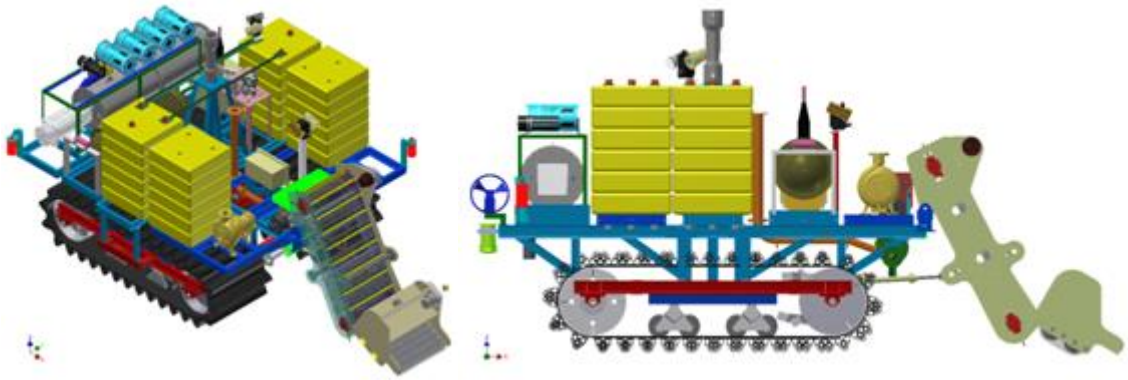


Рисунок 1.4 – Модель сборщика NIOT [59]

В период с марта по апрель 2021 г. в центральной части Индийского океана (CIO) на глубине 5270 м были успешно проведены ходовые испытания гусеничной системы сборщика конкреций. Во время этого теста было пройдено расстояние 120 м. Однако у данной концепции нашлись весомые контраргументы, связанные в первую очередь с нарушением целостности дна, образовании шлейфа от донных осадков. Помимо этого, имеется проблемы с самой конструкцией: низкая продольная и поперечная устойчивость, малое тяговое усилие, невозможность использования на крутых уклонах, повышенная масса, сложность эксплуатации.

5. COMRA, Minmetals, Китай

Ходовая часть: гусеницы.

Концепция представляет собой использование самоходного гусеничного агрегата с гидравлическим коллектором и гидротранспорта – многоступенчатой системы с центробежными насосами. Производительность транспортировки сухих конкреций достигает 30 т/ч, пропускная способность подъемного электронасоса 420 $м^3$/ч, объемная концентрация трубопровода 5% ~ 10%, максимальный размер частиц ЖМК допускается 20 мм.

В ходе проведения морских испытаний в 2021 году на глубинах 100, 300 и 1000 метров сборщик конкреций выполнил 5 подводных операций. Системы передвижения и навигации, входящие в сборщик, прошли успешные испытания как на мягком, так и на твердом грунте. Кроме этого, были проверены системы сбора руды и ее дробления с различными размерами частиц и твердостью. Все системы прошли испытания на водонепроницаемость. В целом, работа систем была стабильной и надежной. Максимальная глубина во время испытаний составила 1306 м. Продолжительность работы составила 202 часа, в ходе которой были успешно собраны полиметаллические конкреции. COMRA завершила эксплуатационные испытания, а также осмотр и сертификацию судна для испытания материнского корабля глубоководной добычи «Хуатуо». Судно имеет водоизмещение 30000 тонн, функцию DP2, общую длину 173,83 м, ширину 32,20 м и глубину 10,50 м.

6. KIOST, Корея

Ходовая часть: гусеницы.

Корейская технология добычи конкреций использует гидротранспорт в качестве средства доставки добываемого сырья на поверхность. Для конкреций выбрана гибридная система сбора, установленная на самоходном гусеничном транспортном средстве. Сборщик MineRo II, по аналогии с некоторыми предыдущими вариантами использует систему подачи струй воды для разрыхления грунта и скребок для сбора из осадочного шлейфа конкреций [124-125].

Разработан концептуальный проект для гибкого райзера. Спроектирован подъемный насос мощностью 800 кВт с объемным расходом 500 $м^3$/ч. Разработана буферная система объемом 7,0 $м^3$.

Рисунок 1.5 – Модель сборщика MineRo-II DSMV [59]

В 2013 году 25-тонный робот MineRo был испытан на маневренность на глубине 1300 метров в водах у юго-восточного побережья Кореи. Морские испытания ходовой части MineRo прошли успешно. Удалось собрать 80% модельных конкреций, которые ранее были заложены под водой. Эффективность извлечения превысила 80%, что считается экономически целесообразным [121-122].

7. Nacrom, США

Ходовая часть: «плавники» роботов-сборщиков

Концепция состоит в том, что оснащенные захватами сотни роботов могут быть отправлены на сбор конкреций. Собранные C-Ray ЖМК будут загружаться в самовсплывающие корзины.

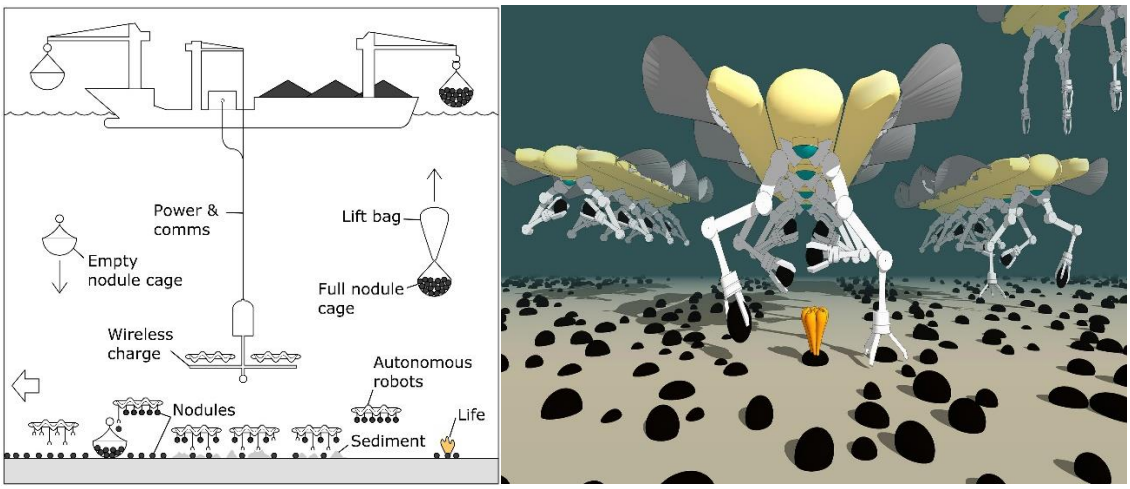


Рисунок 1.6 – Концепция добычи ЖМК Nacrom [59]

Экологические преимущества:

- Минимальный контакт со слоем осадка, минимальное нарушение осадка
- Рой автономных робот могут идентифицировать конкреции с фауной/флорой
- Снижение энергопотребления
- Снижение уровня шума

Экономические преимущества

- Нет трубного става – более низкие капвложения
- Роботы-сборщики могут производиться серийно на сборочной линии
- Неисправные роботы могут быть легко возвращены на поверхность
- Снижение затрат на электроэнергию

8. Impossible Metals, США

Принцип работы: автономные подводные роботизированные аппараты (AUV) для сбора металлов с морского дна.

Impossible Metals используют в своей концепции плавающий сборщик с манипуляторами (рисунок 1.7).

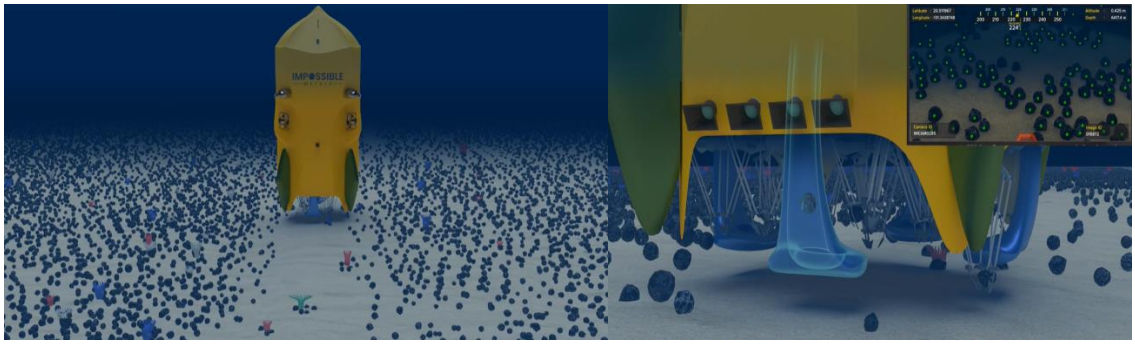


Рисунок 1.7 – Сборщик Eureka II Impossible Metals [59]

Система дистанционного зондирования позволит подводному аппарату выявлять конкреции, в которых обитает глубоководная фауна, и избегать их, а также алгоритмически программировать аппарат так, чтобы он оставлял процент конкреций в качестве островков среды обитания для обеспечения сохранения экосистемы [104].

Отечественные концепции

1. АО Южморгеология, Россия

Ходовая часть: гусеницы.

Создан концептуальный проект с использованием самоходного агрегата сбора (САС) Крыловского Государственного Научного Центра. Функции САС:

а) сбор и первичная обработка ЖМК непосредственно на морском дне за счет рабочего органа и обтекателя:

б) обеспечения управляемого перемещения органа селективной выемки на поверхности морского дна в районе добычи и транспортировка собранных ЖМК от рабочего органа к накопительному бункеру с помощью рамы и ходовой.

В результате выполненных работ предложены различные варианты агрегатов сбора (АС):

а) органы сбора контактного типа, конструкция АС опирается на дно пассивных опорных конструкциях, а движение осуществляется движителями с упором о воду;

б) плавающий вариант АС;

- произведены расчеты энергопотребления технологического оборудования АС;

- определен состав оборудования агрегата сбора, в том числе его комплектующие, устанавливаемые на буфере;

- предложен унифицированный вариант модели агрегата сбора для проведения исследовательских испытаний движителей и органов сбора в натурных условиях.

В ходе выполнения в 2021 году исследований контрактором АО «Южморгеология»: - осуществлен сбор и систематизация необходимых для проектирования добычной техники данных о геологических и горнотехнических условиях отработки российского месторождения полиметаллических конкреций, включая информацию о глубинах и рельефе дна, донных осадках, гидродинамических, гидрофизических и гидрохимических характеристиках водной толщи; - выполнен обзор современных зарубежных и отечественных достижений в области разработки технологии добычи конкреций; - предложена концепция прототипа агрегата сбора полиметаллических конкреций, включающая экспертную оценку требований к техническим параметрам заборного органа, агрегата сбора и дробления.

2. *Интерокеан-металл, Россия, Словакия, Болгария и другие страны.*

Ходовая часть: гусеницы

Совместная организация «Интерокеанметалл» была создана 27 апреля 1987 года на основе Межправительственного соглашения. Соглашение было подписано Болгарией, Вьетнамом, Германской Демократической Республикой, Кубой, Польшей, СССР и Чехословакией, а деятельность началась в декабре 1987 года.

В 2017 году по контракту с ИОМ, ООО «Интехпроект» проведена НИР «Разработка прототипа агрегата сбора (ПАС) и технологии пилотной добычи полиметаллически конкреций на участке месторождения СО «Интерокеанметалл» в Тихом океане» [71].

Работы включали в себя:

а) разработку компоновочной схемы ПАС с определением предварительных весогабаритных характеристик;

б) разработку проекта технического задания на ПАС с определение предварительных весогабаритных характеристик

в) подготовку проектов технических заданий на основные комплектующие узлы для потенциальных соисполнителей (модуль ходовой части, технологическое оборудование, система электроснабжения, система управления);

г) анализ возможных субподрядных организаций;

д) выбор и обоснование технологии подготовки и проведения наземных и морских испытаний ПАС на окружающую среду;

е) оценке влияния испытаний ПАС на окружающую среду;

ж) выбор, обоснование и предложения по доработке и модернизации судна для испытаний;

з) наличие элементной базы, поставщиков комплектующих и соисполнителей

В 2021 году контрактором были продолжены работы по проектированию прототипа полиметаллического конкреционного корректора (рисунок 1.8), концептуальный проект которого был разработан в рамках НИР, проведенных СО «Интерокеанметалл» в 2017-2020 гг.

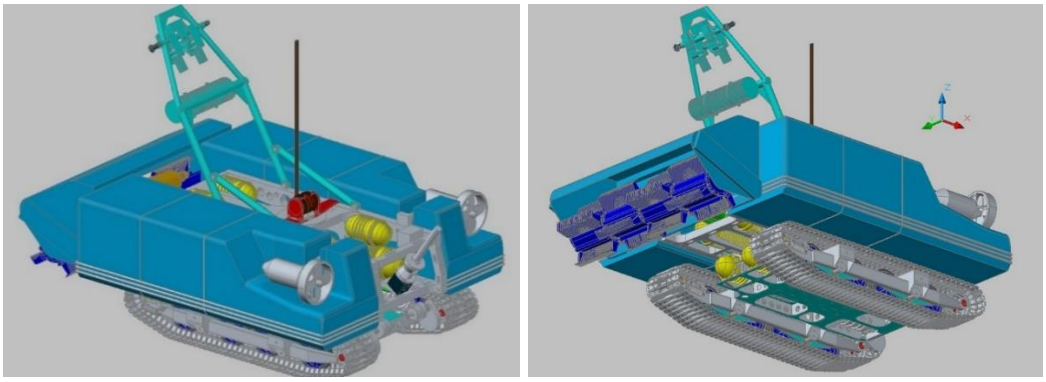


Рисунок 1.8 – Прототип коллектора ЖМК «Интерокеанметалл» [59]

3. ООО «ГИКО» и ГНЦ Крылова, Россия

Ходовая часть: гусеницы.

Совместная концепция ООО «ГИКО» и ГНЦ Крылова предполагает использование в качестве прототипа агрегата сбора имеющуюся подводную буровую самоходную установку УНПА ГК-5000 (рисунок 1.9). В рамках предлагаемой НИОКР предусмотрено проектирование и изготовление агрегата сбора, а также его основных систем и компонентов: органа сбора, бункера для ЖМК, траков агрегата сбора, интерфеса пульта управления, телеметрии и эхолота.

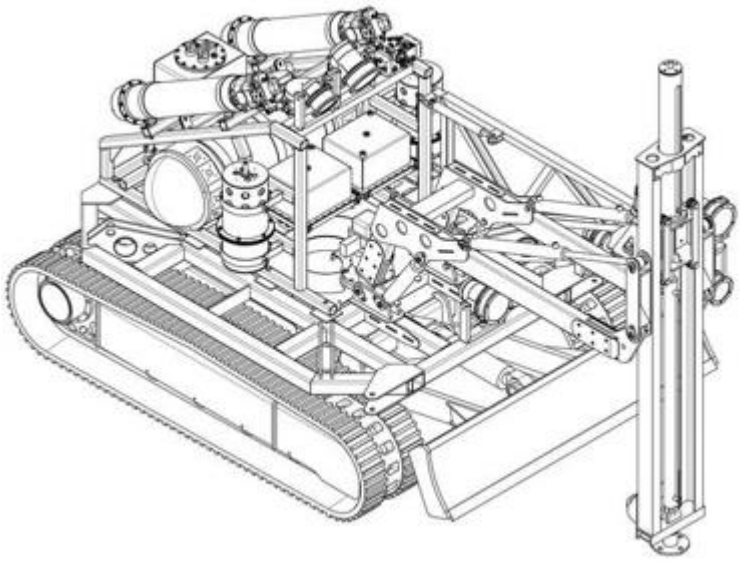


Рисунок 1.9 – Подводная буровая самоходная установка УНПА ГК-5000 [59]

Основные требования, предъявляемые к макетному образцу следующие:

- макетный образец глубоководного аппарата сбора ЖМК представляет собой подводное буксируемое транспортное средство на гусеничном ходу с максимальной глубиной погружения 5000 м и скоростью хода от 0,1 до 0,5 м/сек.

- Основные функции:

а) сбор конкреций (орган сбора);

б) гидравлическая перекачка конкреций в накопительную емкость;

в) прием грузовых контейнеров, размещение их на горизонтальном транспортере, перемещение по транспортеру, сброс балласта, загрузка ЖМК и выпуск загруженных контейнеров с транспортера;

г) выполнение маневров по курсу для обхода препятствий по командам телеуправления

4. АО «МРТС»/ООО «ФЕРТОИНГ», Россия

Предложенный вариант в основных чертах придерживается добычной схемы компании «NeptunMinerals» (США) [118-119]. Предлагается использовать дистанционно управляемый грейфер, тяжелого рабочего класса, оснащенного собственным движительным комплексом, подводными камерами и многолучевым гидролокатором кругового обзора (рисунок 1.10). Рассматривается возможность оснащения грейфера режущими фрезами для измельчения трудно извлекаемой породы, которые могут быть вмонтированы непосредственно в «челюсти» ковша [72]. Такая модернизация (оснащенность) грейфера должна позволить выполнять работы по выемке руд максимально экологически безопасно [69-70].

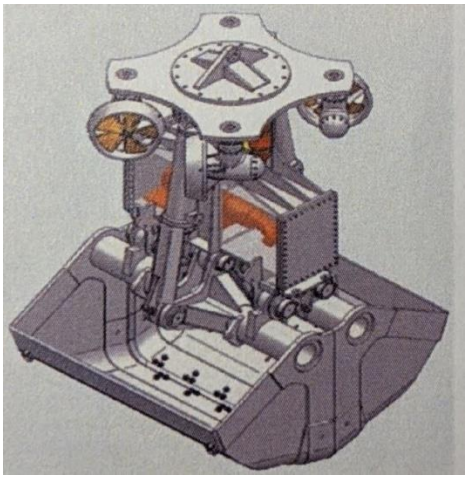


Рисунок 1.10 – Дистанционно управляемый грейфер тяжелого рабочего класса [59]

Имеющийся у АО «МРТС» грейфер может работать с породами, имеющими прочность до 180 Мпа. Была произведена модернизация грейфера с установкой 4-х режущих фрез для измельчения трудно извлекаемой породы и увеличения объемов добываемого материала при каждом технологическом цикле (спуске) [85-86].

Перспективность этого проекта заключается в отсутствии специальной сложной и дорогостоящей системы подъема руды на добычное судно.

5. ФГУП «Океангеотехника» и АО «Южморгеология», Россия

Ходовая часть: гусеницы

Концепция рассчитана на глубину погружения 3000 м. Модель агрегата сбора для КМК, разработанная в девяностых годах прошлого века российскими конструкторами, является достаточным основанием для промышленного образца АС, учитывая этапы выполненных экспериментальных работ по отдельным узлам и механизмам.

Разрабатываемая техника добычи КМК в целом может быть применима и для добычи ЖМК, и наоборот. Это позволит создать единый комплекс добычи двойного назначения и производить замену отдельных подсистем в зависимости от свойств осваиваемых рудных залежей [104, 112].

Техническая производительность добычного агрегата с исполнительным органом барабанной фрезой – 35 т/ч, средняя скорость движения при работе – 0,25 м/с, преодолеваемая крутизна склонов до 15º, максимальная толщина снимаемой стружки – 50 мм, крупность кусков фракций – 60 мм [78-79].

Проведенный критический анализ актуальных на сегодняшний день концепций показывает, что геологические параметры и экологические ограничения определяют конструктивные особенности, как исполнительного органа, так и органа перемещения подводных агрегатов в составе комплекса добычи твердых полезных ископаемых (ТПИ) Мирового Океана [17, 24]. В случае с ЖМК необходим захват ископаемого при помощи грейферного механизма с сохранением целостности океанической биоты. Для КМК применим грейфер с ударником ввиду необходимости откалывания породы [12, 20].

На сегодняшний день в области разработки морских ТПИ присутствует ряд проблем:

1. Отсутствие единой концепции ведения горных работ на дне.
2. Испытания опытного образца глубоководного добычного комплекса возможно только при согласованной работе в месте испытаний всех машин, агрегатов и структурных единиц, (судно, добычное и вспомогательное придонное оборудование, устройство для спускоподъемных операций, транспортирующее устройство для полезного ископаемого, система телеметрии, придонная гидроакустическая система реперов) [110-111].

3. Жесткие требования по снижению экологического воздействия механизмов на придонные области: флору и фауну [117].

4. Необходимость разработки математического и аппаратного обеспечения средств телеметрического управления роботами и придонными машинами; гидроакустических аппаратов для привязки придонного оборудования к координатным реперам на дне и реперов к судну на поверхности [116].

5. Отсутствие апробированных высокопроизводительных устройств для подъема полезных ископаемых с глубины > 5 км, серьезные технически сложности создания гидротранспортной подъемной установки [122-123].

6. Необходимость создания подъемной установки с кабель-тросом высокой прочности и гибкости.

7. Потребность обоснования технологических цепочек добычных морских комплексов, включающих или исключающих придонную рудоподготовительную стадию работ [108-109].

8. Трудности создания промышленной технологии извлечения металлов из ЖМК/КМК [80-81].

9. Сложность подготовки технико-экономического обоснования (ТЭО) конкретных конструкций глубоководного комплекса при отсутствии основных экономических показателей эффективности работы [15, 25].

1.3 Конструкция систем транспортировки собранных ЖМК

Подъем собранных конкреций – одна из наиболее трудоемких задач исследуемого процесса. Известны способы подъема при помощи гидротранспорта [1, 17], всплывающими кассетными тралами [23, 100] и при помощи кевларового или арамидного кабель-троса [6, 99].

В обобщённой форме добычный комплекс [80-81], независимо от применяемой системы подъема, включает в себя морское судно 1, подводную горную машину с механизмом извлечения 2 и трубопровод с положительной плавучестью 3 (см. рис. 1.11).

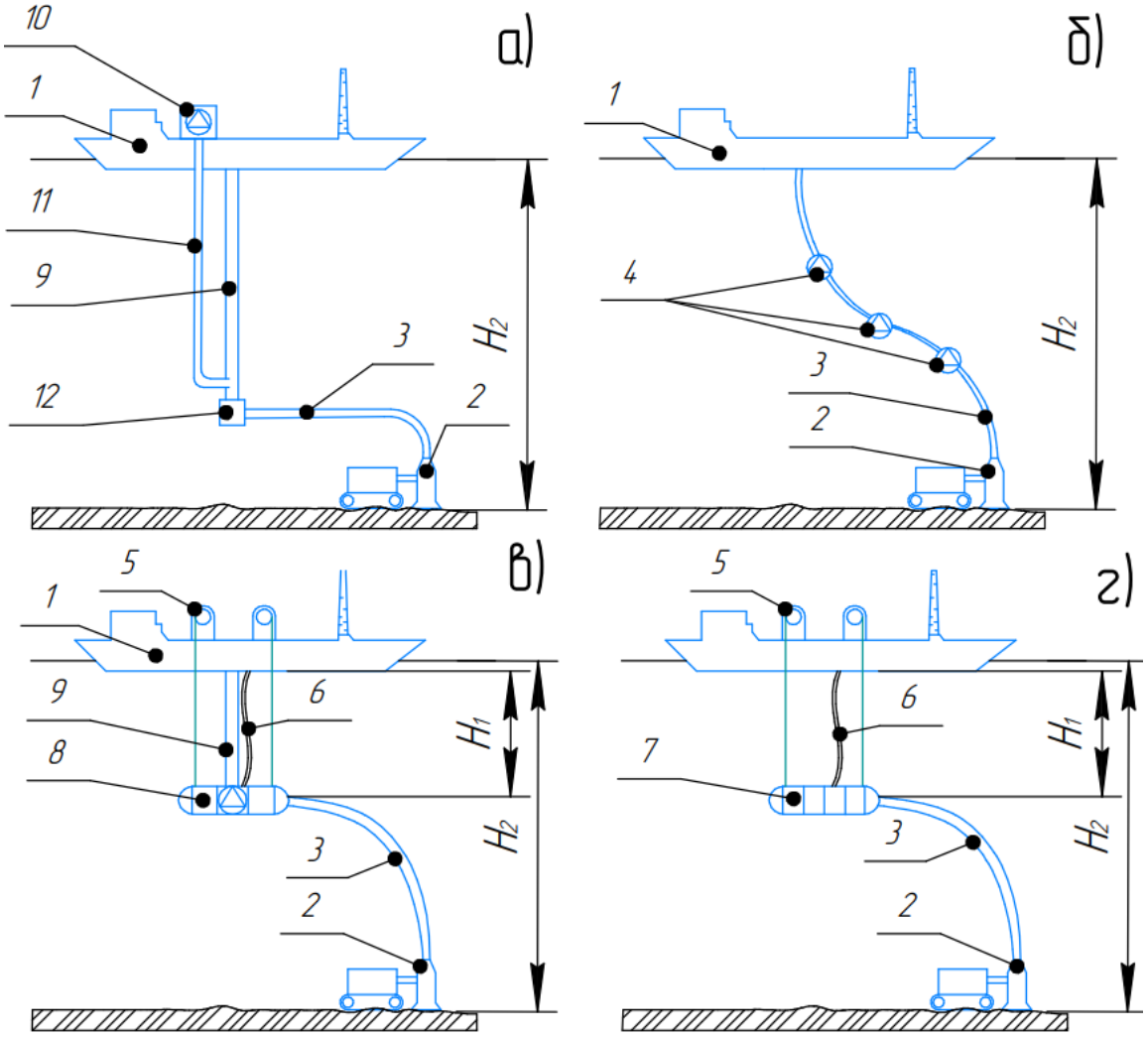


Рисунок 1.11 – Схемы технологий подъема собранных ЖМК гидротранспортом: а) эрлифтная; б) насосная; в) двухстадийная; г) комбинированная (составлено автором)

В случае использования эрлифтной подъемной системы она состоит из вертикального трубопровода 9, компрессорной установки 10, установленной на борту судна, воздухопровода 11 и коллектора 12. Сжатый воздух, подаваемый компрессорной установкой 10, транспортируется по воздухопроводу 11 и вводится в трубопровод 3 на определённом удалении от коллектора 12. В результате этого в коллекторе формируется трёхфазная смесь, включающая воду, воздух и извлечённое твердое вещество. Подъём этой смеси осуществляется за счёт разницы плотностей между нижним и верхним слоями потока. Несмотря на то, что технология относится к частному случаю поточного способа, она обладает значительным потенциалом. Основным её недостатком является низкий КПД

(порядка 25–30%), что влечёт за собой ограниченную энергетическую эффективность [74].

Насосный метод гидроподъема реализуется посредством многоступенчатого трубопровода 3, в который встроены промежуточные насосы 4. В зависимости от требуемых параметров напора и расхода возможно как последовательное, так и параллельное размещение насосных агрегатов. Перемещение твёрдых полезных ископаемых (ТПИ) осуществляется в виде двухфазного потока под действием насосов 4. Этот метод отличается наивысшей производительностью, но при этом характеризуется высокой металлоёмкостью, значительным энергопотреблением и ограниченной надёжностью: отказ одного насоса влечёт за собой остановку всей системы до устранения неисправностей [77].

При двухстадийной схеме подъема применяется промежуточная капсула с насосным узлом 8 [79]. Первая стадия предусматривает транспортировку материала в капсулу за счёт гидростатического давления, создаваемого глубиной её размещения и атмосферным давлением, поддерживаемым через гибкий воздуховод 6. Эта стадия не требует затрат энергии на работу силового оборудования. Вторая стадия – это подъем от капсулы до морского судна посредством встроенного в капсулу насоса 8 и вертикального трубопровода 9. Данный этап требует значительно больше энергии, так как осуществляется в условиях атмосферного давления и требует преодоления силы тяжести. Спуск и подъем оборудования обеспечиваются судовыми лебедками 5 [76].

Циклично-поточная технология схожа с двухстадийной, но исключает использование насосов внутри промежуточной капсулы 7. Оставшаяся часть пути преодолевается путём подъема капсулы на судно с помощью лебедок 5. Повышенная надёжность комплекса достигается за счёт отсутствия необходимости в обслуживании оборудования внутри капсулы. При этом добывающая машина может продолжать функционировать во время спускоподъемных операций, аккумулируя ТПИ во внутреннем резервуаре. Однако при такой организации работы особое значение приобретает минимизация времени спускоподъемных циклов при сохранении высокой производительности [73].

Для подъема конкреций с глубины 5000 метров необходима многоступенчатая гидравлическая система с большим количеством промежуточных капсул. Более того, требуется четырехслойная трубе большого диаметра с нулевой плавучестью. Изготовление такой трубы в настоящее время отечественными производителями затруднительно.

Комплекс для добычи ЖМК может использовать технологию всплывающих тралов (рисунок 1.12) [23]. Технический результат разработанного изобретения заключается в повышении эффективности функционирования тралового комплекса за счёт сокращения числа холостых пробегов, увеличения полноты извлечения целевого полезного компонента, снижения зависимости продолжительности производственного цикла от погодных условий, а также упрощения конструкции устройства и снижения затрат на подъем добытого материала с морского дна на поверхность.

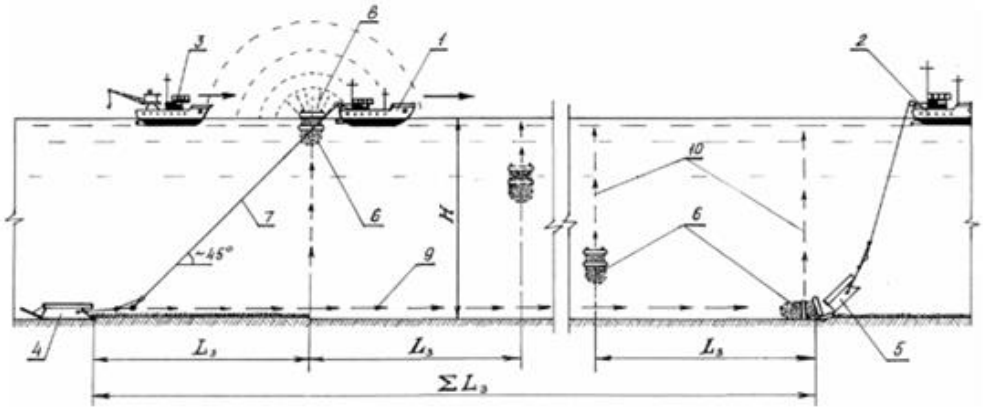


Рисунок 1.12 – Принципиальная схема использования кассетных тралов при разработке ТПИ [23]

Достижение поставленного технического результата обеспечивается тем, что при поступательном движении добычного устройства, буксируемого судном-буксировщиком, отделённые от дна полезные ископаемые (в частности, конкреции) направляются в сетчатую приёмную емкость, выполненную из особо прочного пластика. Эта емкость оснащена баллонами со сжатым воздухом и подъемными элементами. После наполнения емкости конкрециями она под действием силы тяжести сдвигается с платформы добычного устройства на морское дно, а её место занимает следующая приёмная емкость, предварительно

размещённая в кассете, установленной в верхней части устройства. Обе емкости соединяются между собой гибкими тягами. Далее, при движении установки, происходит активация клапанов баллонов, в результате чего подъемные емкости наполняются воздухом, обеспечивая всплытие трала. После достижения положительной плавучести трал отделяется от основного устройства и всплывает, где его подбирает судно-транспортировщик. Для облегчения обнаружения всплывшего трала он оборудован сигнальным устройством, автоматически активирующимся при выходе на поверхность.

Для реализации описанного способа предлагается специализированное устройство, конструктивно представляющее собой ковш в форме четырёхугольной призмы, снабжённый отвалом для врезания в залежь, не имеющий задней стенки, а также комплектом тяговых и управляющих тросов. В его состав входят сетчатые приёмные емкости для сбора материала и подъемные элементы в виде гибких надувных баллонов, заполняемых воздухом. Конструктивной особенностью установки является наличие кассеты, закреплённой в верхней части ковша, в которой в свернутом виде размещены отдельные тралы — сетчатые мешки из особо прочного пластика, снабжённые баллонами сжатого воздуха с клапанами и гибкими подъемными емкостями из армированной прорезиненной ткани. При наполнении воздухом данные емкости приобретают форму тора и также размещаются в кассете в сложенном состоянии. Связь между тралами осуществляется через гибкие тяги, соединенные с катками различного диаметра: одни обладают положительной, а другие — отрицательной плавучестью. Конструкция также включает гибкий каркас, обеспечивающий стабильное положение загрузочного отверстия трала при его заполнении, и качающуюся плиту, шарнирно прикрепленную к днищу ковша, которая удерживается пружинными тягами в рабочем положении (примерно 7°) и может отклоняться в горизонтальную плоскость под действием силы тяжести. На внутренних стенках ковша предусмотрены направляющие, размеры которых допускают прохождение катков меньшего диаметра, но препятствуют проходу катков большего размера.

При этом качающаяся плита в приподнятом положении блокирует выход из направляющих.

Работа системы организована так, что длина тяг, связывающих клапаны баллонов с соответствующими катками, рассчитана с учётом последовательности активации: сначала срабатывают клапаны баллонов, находящихся ближе к дну, обеспечивая разворот трала загрузочным отверстием вверх. Затем, по мере заполнения всех баллонов и достижения полной положительной плавучести, трал всплывает на поверхность, где активируется сигнальное устройство, закреплённое на емкости.

Принцип функционирования комплекса базируется на сборе конкреций ковшом, заполнении высокопрочной сетчатой емкости и последующем подаче сжатого воздуха для обеспечения плавучести и подъема трала на поверхность. Преимуществами данного технического решения являются высокая степень наполнения приёмных емкостей и, как следствие, высокая производительность. По оценкам авторов разработки, эксплуатация одного комплекса позволяет добывать не менее 100 тысяч тонн сырья в год.

В случае расположения данных месторождений на глубинах более 1500 метров использование драг нецелесообразно в связи с длительным циклом спуска-подъема ковша и увеличения требуемого объема гибких емкостей в пять раз, что конструктивно тяжело осуществимо [100].

1.4 Конструкции придонных аппаратов

Nautilus Minerals — канадская горнодобывающая компания, которая специализировалась на разведке и разработке месторождений подводных полезных ископаемых. Компания была основана в 1989 году и прославилась как один из пионеров в области добычи минералов на морском дне. На момент своей активности, Nautilus Minerals была первой компанией, которая планировала коммерческую добычу таких минералов как золото, медь, цинк и другие редкие элементы с океанического дна, используя для этого инновационные технологии [113-115].

Один из самых известных проектов компании был Solwara 1, расположенный в экваториальной части Тихого океана, в 1600 метрах от побережья Папуа - Новой Гвинеи. Проект предполагал добычу высококачественной меди, золота и других минералов с глубоководных гидротермальных источников. Этот проект представлял собой не только технологическую новизну, но и значительный экологический вызов, так как добыча проводилась на больших глубинах в открытом океане. Для этого проекта компания разработала несколько уникальных подводных роботов и оборудования (рисунок 1.13), включая:

- Подводные экскаваторы для выемки горных пород;
- Системы для поднятия и транспортировки добычи на поверхность;
- Специальные подводные буровые установки, предназначенные для работы на таких глубинах.

Несмотря на первоначальные амбиции, Nautilus Minerals столкнулась с множеством проблем. В частности, добыча на глубинах океанов может вызвать разрушение местных экосистем, изменение химического состава вод и воздействие на морскую флору и фауну, что вызвало протесты экологов и общественности и добавило сложности в реализацию проекта.

В 2019 году Nautilus Minerals подала заявление о банкротстве, после чего её активы были проданы, а бизнес прекратил существование. Хотя деятельность Nautilus Minerals завершилась, её разработки в области подводной добычи повлияли на дальнейшее развитие технологий в этой отрасли. Некоторые из этих технологий продолжили развиваться и использоваться другими компаниями. Например, компания The Metals Company (ранее известная как DeepGreen) продолжила работу в сфере подводной добычи, фокусируясь на добыче минералов для производства аккумуляторов и в области возобновляемых источников энергии. The Metals Company активно сотрудничает с островными государствами Тихого океана, включая Науру, для получения контрактов на разведку и добычу в зонах глубоководного дна. Компания делает ставку на экологически обоснованный подход, заявляя о минимизации воздействия на морские экосистемы по сравнению с традиционной горнодобычей. В рамках своих проектов она разрабатывает

роботизированные комплексы для сбора полиметаллических конкреций с океанического дна. Эти разработки опираются на наработки Nautilus Minerals, адаптированные под современные стандарты экологической ответственности. Кроме того, ведутся активные научные исследования, направленные на оценку влияния подводной добычи на биологическое разнообразие. Подобные инициативы демонстрируют трансформацию отрасли в сторону более устойчивых и технологически продвинутых решений.

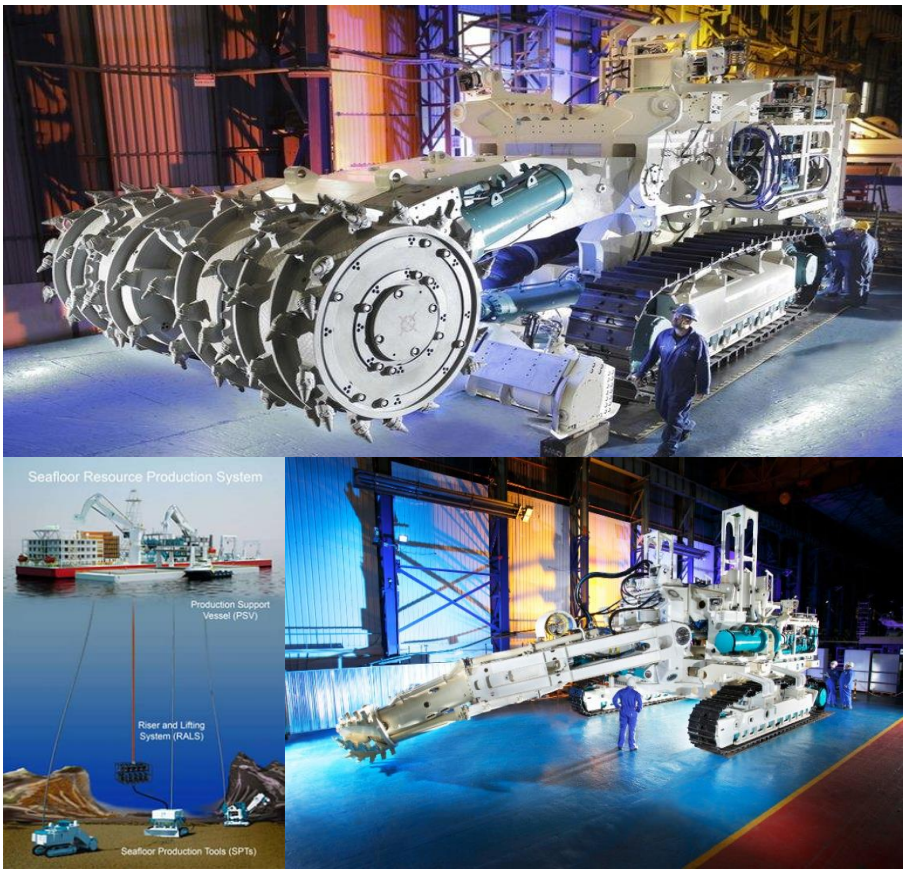


Рисунок 1.13 – Концепция Nautilus Minerals [113]

Многие технологии включают в себя гидротранспорт в качестве транспорта, но эти технологии имеют ряд недостатков:

1. Из-за значительной глубины залегания для добычи ЖМК/КМК требуется большое количество промежуточных капсул.

2. Извлекаемый материал представляет собой пульпу: при движении по трубопроводу без предварительного измельчения неизбежны процессы гидроабразивного износа стенок.

3. При гидротранспорте необходимо учитывать внешние факторы: взаимодействие с морскими течениями и объектами (в том числе живыми) являются факторами риска и должны быть учтены при проектировании.

4. Вышеперечисленные требования усложняют конструкцию трубопровода: требуется трехслойная труба и капсулы с насосами и промежуточными бункерами с так называемой "нулевой плавучестью".

1.5 Параметрический анализ устройств для добычи глубоководных полезных ископаемых

Для сравнения и анализа способов перемещения по дну в таблице 1.2 сведены параметры придонных сборщиков по трем критериям: способ перемещения, эффективность сбора и воздействие на грунт. Представлены типы устройств: гусеничные, колесные, рельсовые, шагающие, и другие устройства.

Таблица 1.2 – Параметрический анализ устройств сбора ЖМК (составлено автором)

Тип устройства	Перемещение	Эффективность сбора	Воздействие на грунт
Гусеничные самоходные комбайны	Высокая проходимость, адаптация к сложному рельефу, но относительно низкая скорость	Высокая, механическое поднятие ЖМК и КМК с возможностью сортировки	Высокое: разрыхление донных осадков, взмучивание частиц, нарушение микрофауны
Колесные самоходные машины	Хорошая маневренность на твердых грунтах, но ограничена в вязких и рыхлых осадках	Средняя: зависимость от плотности и распределения полезных ископаемых	Среднее: меньшее взмучивание осадков по сравнению с гусеничными

Продолжение таблицы 1.2

Рельсовые системы	Высокая стабильность, ограничение по зоне покрытия	Высокая: эффективный сбор в заданном коридоре	Среднее: ограниченная площадь воздействия
Летающие ROV с гидравлическими манипуляторами	Высокая мобильность, не контактируют с грунтом	Средняя: требует точного управления манипуляторам	Низкое: минимальный контакт с дном, не разрушает осадочный слой
Плавучие насосные системы с гидроразмывом	Не требуют наземного передвижения, используют гибкие шланги	Высокая: высокая скорость забора материала	Высокое: сильное взмучивание осадков, высокие потери полезного материала
Шагающие аппараты	Высокая проходимость, адаптация к сложному рельефу, исключение пробуксовки	Средняя: скорость ниже, но высокая точность сбора	Низкое: минимальное разрушение донного грунта, локальное воздействие
Биомиметические устройства	Гибкость, адаптация к сложному рельефу	Средняя: ориентированы на селективный сбор	Низкое: минимальное нарушение структуры грунта

Шагающие устройства представляют собой баланс между перемещением и воздействием на грунт. Они минимизируют взмучивание осадков, не разрушая

грунт, но имеют более низкую скорость сбора по сравнению с гусеничными и насосными системами [28, 84].

Оптимальный вариант для максимальной эффективности добычи – гусеничные комбайны или гидроразмывные системы, но они наносят значительный ущерб экосистеме [87].

Компромисс между добычей и минимальном разрушении донного грунта – шагающие аппараты или рельсовые системы [89-91].

Наименее воздействующие на грунт – биомиметические устройства, но они уступают в скорости и эффективности [106-107].

1.6 Анализ методик расчетов основных составляющих глубоководного комплекса добычи ЖМК

Расчет движения шагающего подводного агрегата, использующего гидропривод, включает в себя несколько задач: гидродинамику, механику шагающих ног и работу гидроприводов. Рассмотрим основные формулы и зависимости, которые описывают этот процесс.

1) В общем виде производительность морского комплекса добычи ЖМК по массе транспортируемых на судно ТПИ выражается формулой (1.1):

$$Q_{\text{год}} = \frac{G_{\text{б}}}{T_{\text{ц}}}, \tag{1.1}$$

где $G_{\text{б}}$ – грузоподъемность бункера для сбора ЖМК, кг,

$T_{\text{ц}}$– общее время цикла добычи, с.

2) Для расчета полезного веса добываемых ЖМК и определения грузоподъемности бункера целесообразно использовать формулу (1.2), исходя из известных параметров каната, бункера, коэффициента запаса и динамической составляющей:

$$F_{\text{г}} = F_{\text{max}} - F_{din} - G_{cont} - F_{\text{гидр}} - G_{\text{кан}} - F_{\text{кан}}, \tag{1.2}$$

где F_{max} – максимальная нагрузка на канат, Н,

F_{din} – динамическая нагрузка силы натяжения, Н,

G_{cont} – масса бункера для сбора ЖМК, Н,

$F_{\text{гидр}}$ – нагрузка от сопротивления при подъеме, Н,

G_T – вес каната, Н,

$F_к$- нагрузка от сопротивления каната, Н.

Грузоподъемность бункера $G_б$ определяется путем округления массы, полученной в результате вычисления величины $F_г$. В справочнике «Судовые устройства» М.А. Александрова подробно представлен расчет динамической составляющей растягивающего усилия (1.3) [2]:

$$F_{din} = \frac{ESv}{a}\left(b + f\sqrt{\mu}\right), \quad (1.3)$$

где E – модуль упругости материала каната, Па;

S – площадь поперечного сечения каната, м^2,

v – скорость подъема канатной установкой, м/с,

a – скорость звука вдоль связи для продольных колебаний груза на упругой гибкой нити, м/с,

b – безразмерный коэффициент, определяемый величиной μ,

f – безразмерный коэффициент, определяемый величиной μ,

μ – коэффициент относительности масс груза и каната.

3) В формуле 1.2 представлена сила сопротивления $F_{гидр}$ при канатном подъеме груза с учетом использования сферического обтекателя с меньшим гидродинамическим коэффициентом. Величина рассчитывается по формуле (1.4):

$$F_{гидр.} = c_x \cdot S \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1.4)$$

где c_x – безразмерный коэффициент гидродинамического сопротивления,

S –миделево сечение перемещаемого объекта, м^2,

ρ – плотность воды, кг/м^3,

v – скорость объекта, м/с.

4) Величина в знаменателе формулы (1.1) в упрощенном виде представляет собой совокупность временных затрат на операции по сбору на одном участке и закладываемого времени на перемещение на следующий участок и выражается соотношением (1.5):

$$T_ц = \sum n \cdot \left(t_{сб.} + t_{п.} + t_{р.} + t_{сп.}\right) + t_{см.}, \quad (1.5)$$

где $t_{\text{сб.}}$- время сбора ЖМК, с,

$t_{\text{п.}}$ – время подъема собранных ЖМК, с,

$t_{\text{р.}}$ – время разгрузки ЖМК, с,

$t_{\text{сп}}$ – время спуска бункера, с,

$t_{\text{см}}$- время смены участка добычи, с,

n – количество бункеров, поднятых с одного участка до его истощения.

5) Время смены участка $t_{\text{см}}$ добычи зависит от скорости передвижения ПС. Общее уравнение движения подводного агрегата шагающего типа, использующего гидросистему с гидроцилиндрами представлено формулой (1.6):

$$\frac{dx}{dt} = \frac{x}{\sum_i t_1 + t_2 \ldots + t_i}, \tag{1.6}$$

где x – расстояние, на которое перемещается ПА, м,

t_i – время, затрачиваемое на перемещения рычагов-манипуляторов, в зависимости от задаваемого алгоритма, с.

6) Дополнительной задачей является расчет подруливающих устройств рамы с ходовыми винтами, представляющей по сути своей спускоподъемный спредер. Цель использования подруливающих устройств – центрирование спускаемого оборудования при доставке на участок. Расчет подруливающих устройств для подъемного устройства – рамы с ходовыми винтами согласно справочнику Александрова М.Н. «Судовые устройства» при известных величинах мощности привода $N_{\text{в}}$, потребной тяги устройства $T_{\text{у}}$ определяется диаметр гребного винта (1.7):

$$D_{\text{в}} = \left(\frac{T_{\text{у}}}{\zeta' \left(\frac{\pi}{2}\rho\right)^{\frac{1}{3}} N_{\text{в}}^{\frac{2}{3}}} \right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{T_{\text{у}}}{\zeta'}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi}{2}\rho N_{\text{в}}}}, \tag{1.7}$$

где ζ'- коэффициент сопротивления формы туннеля;

ρ – плотность воды, кг/м^3,

$N_{\text{в}}$ – мощность привода, Вт,

$T_{\text{у}}$ – требуемая тяга устройства, Н.

1.8 Выводы по главе 1

Анализ способов и особенностей конструкций устройств для ведения добычи придонных полезных ископаемых позволил сформулировать следующие выводы:

1) Глубоководные ресурсы мирового океана, в частности железомарганцевые конкреции, являются альтернативным источником кобальта, марганца и других ценных металлов, используемых во многих отраслях промышленности, что говорит о необходимости и актуальности исследований в этой сфере.

2) Проведенный обзор существующих зарубежных и отечественных концепций добычи в подавляющем большинстве свидетельствует о применении гусеничных механизмов ходовой части сборщиков. Однако, несмотря на простоту исполнения сборщиков, их применение остается под большим вопросом ввиду сопутствующего ущерба придонной биоте при передвижении по дну.

3) Проведенный обзор существующих систем транспортировки ЖМК до судна обеспечения представил недостатки гидротранспорта и системы подъема всплывающими капсулами. При анализе конструкций придонных аппаратов Nautilus Minerals конкретизированы сложности использования гидротранспорта, как систему доставки ЖМК на судно.

4) Параметрический анализ устройств для добычи глубоководных полезных ископаемых позволил определить применимость ходовой части и исполнительных органов в виде рукоятей-манипуляторов сборщиков и вспомогательных устройств в составе добычного комплекса.

5) В конце главы проведен анализ методик расчетов компонентов добычного комплекса, ранжированных от производительности комплекса к более узконаправленным вычислений: полезного веса ЖМК и времени цикла добычи.

По результатам проведенного анализа сформулирована цель диссертационной работы.

Цель диссертационной работы повышение производительности добычного комплекса железомарганцевых конкреций при использовании канатной системы для спускоподъемных операций и вспомогательного оборудования для смены участка добычи путем местной транспортировки груза и добычной станции.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Проанализировать и обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы, в том числе анализ методик расчета шагающих механизмов, грузоподъемности кабель-троса, времени цикла и производительности комплекса добычи ЖМК.

2. Провести теоретические исследования по анализу процессов работы подводных устройств на основе возникающих сил гидродинамического сопротивления как в процессе местной транспортировки собранного груза и вспомогательного оборудования при смене участка добычи, так и дальнейшего подъема на поверхность канатной установкой.

3. Разработать компоновочную схему подводного спредера, шагающего на рукоятях-манипуляторах в условиях глубоководной добычи, а также кинематику движения его ходовой части с учетом различного количества и конструктивного исполнения рукоятей-манипуляторов

4. Определить гидродинамическое сопротивление рукоятей-манипуляторов, влияющее на скорость перемещения ПС, на основе экспериментальных исследований на стенде, для оптимизации конструкции ходовой части подводного спредера путем придания гидродинамической формы рукоятям-манипуляторам.

5. Разработать методику расчета основных параметров шагающего подводного спредера в составе добычного комплекса с грузоподъемным кабель-тросом и обосновать расчет производительности добычи с учетом указанной кинематики движения и выбранной конструкции кабель-троса.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ДОБЫЧИ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ

2.1 Анализ способов перемещения подводных аппаратов по дну

Для сравнения способа перемещения подводных аппаратов в составе добычного комплекса [14, 16] были введены ряд функций, по которым производилась оценка. Функции перечислены в табл. 2.1, каждой из которых присвоен номер на векторной диаграмме от Ф1 до Ф8 (всего 8 сравнительных параметров). Каждой функции присвоен коэффициент важности, где 1,0 – самый важный параметр, 0,3 – наименее важный параметр. Далее каждому способу перемещения выставляется оценка по каждой функции. Оценка 1 – соответствует наилучшему достижению, оценка 0,1 – наихудшему.

Для получения суммарной оценки по всем параметром необходимо соответственно перемножить оценку на коэффициент важности для каждой функции, после чего суммировать. Устройство, получившее максимальную оценку, является наиболее эффективным при заданных приоритетах и коэффициентах важности.

Таблица 2.1 – Сравнение устройств перемещения придонных агрегатов (приоритет по воздействию на придонную область) (составлено автором)

Функции	№ функции на векторной диаграмме	Коэффициент важности	Устройство с манипуляторами и рукоятями	Шагающий ход с кран-балкой	Гусеничный ход
Возможность снабжения разными захватывающими устройствами	Ф1	0,3	1	0,7	1
Высокая скорость передвижения	Ф2	0,7	0,8	0,6	1

Продолжение таблицы 2.1

Устойчивость во время работы	Ф3	0,6	0,9	0,8	0,9
Простота основных узлов	Ф4	0,5	0,7	0,8	0,6
Сохранение придонных областей	Ф5	1	1	0,5	0,4
Высокая производительность сбора	Ф6	0,8	0,7	0,8	1
Наличие аналогов основных узлов в промышленности	Ф7	0,4	0,8	0,7	1
Не создание замутнения мелкодисперсным илом в зоне работы	Ф8	0,9	0,9	0,4	0,3
Суммарная оценка			**4,44**	**3,29**	**3,71**
Оценка по векторной диаграмме			**7958**	**4799**	**6007**

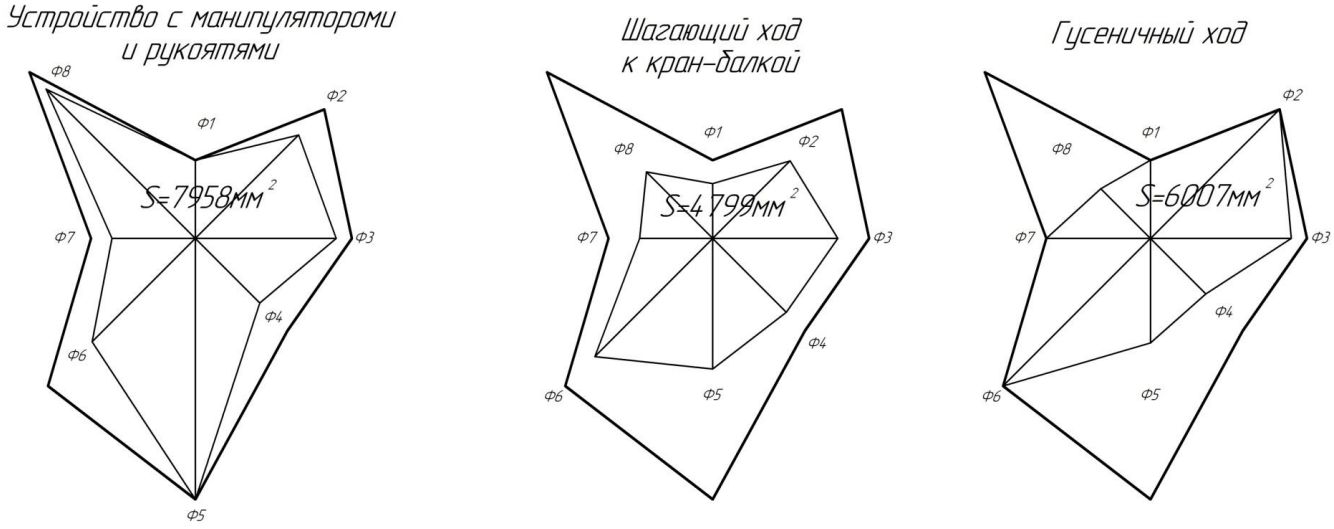


Рисунок 2.1 – Эффективность использования устройств перемещения по дну добычных машин по фактору «Воздействие на придонную область»

Как показано в табл. 2.1 и графиках на рис. 2.1 приоритет по параметрам «Воздействие на придонную область» выводит на высокие места устройства манипуляторами и рукоятями (рисунок 2.2) [39, 40].

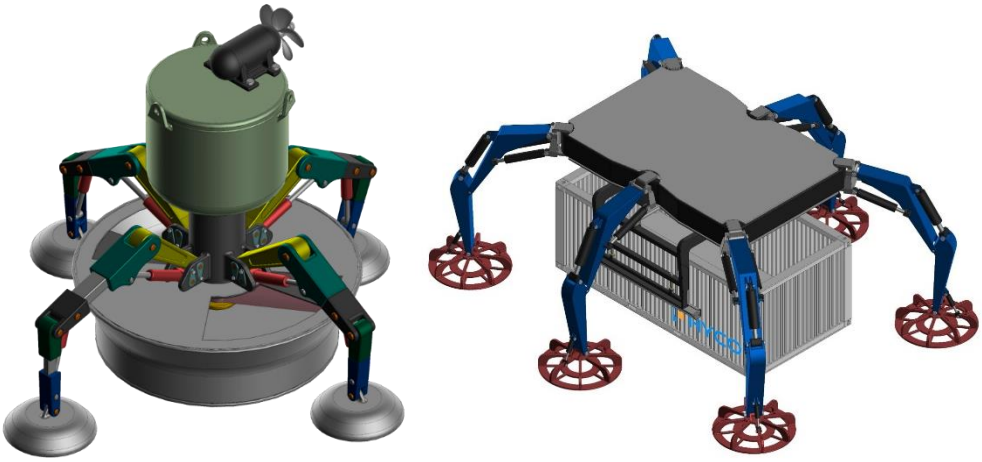


Рисунок 2.2 – Подводные устройства шагающего типа (слева – шагающий сборщик, справа – подводный спредер (ПС) для переноса бункера) [41-43]

Шагающие аппараты особенно перспективны для сложного донного рельефа, где другие системы могут испытывать затруднения.

2.2 Определение компоновочной схемы и параметров устройства для транспортировки ЖМК

В первой главе были рассмотрены варианты транспортировки собранных ЖМК эрлифтом, гидротранспортом [46-47] и технологией, использующей кассетные тралы. Основное внимание в данном разделе уделяется канатному способу транспортировки ЖМК [51-53]. Прежде всего, стоит отметить, что существующие предложения транспортных систем, использующих тросовый подъем-спуск, имеют ряд замечаний [18–20]:

- необходимо производство и использование кабель-тросов с повышенным разрывным усилием, например, с кевларовой или арамидной оплеткой;

- комплекс должен обеспечиваться устройствами для операций перегрузки и загрузки: бункеры, питатели, передвижные шагающие устройства для переустановки оборудования;

- следует учитывать внешние факторы (волнение моря, подводные течения) при проектировании: в конструкции устройства необходимо наличие компенсации вертикальных колебаний троса;

- рентабельная производительность комплекса зависит от непрерывности процесса добычи и наименьших временных затрат на подъемно-спусковые операции.

Транспортировка конкреций кабель-тросом позволяет достичь производительности комплекса около 500 тыс. тонн в год [58]. Арамидный кабель-трос с высоким разрывным усилием способен поднять резервуар грузоподъемностью 50-60 тонн за 40 минут. Комплекс включает в себя судно, с которого на кабель-тросе спускается платформа с шагающими роботами для сбора или откалывания породы (рисунок 2.3, поз. 5).

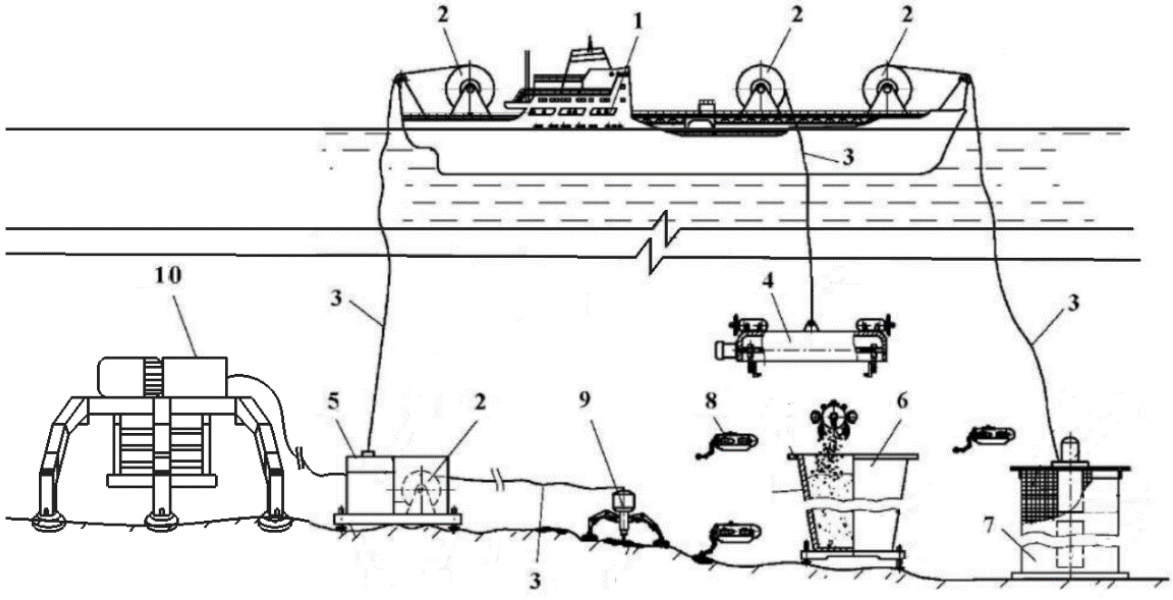


Рисунок 2.3 – Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых (составлено автором), где: 1 - базовое судно, 2 – лебедка, 3 – кабель-трос, 4 – захватывающее устройство – рама, 5 – платформа с шагающими роботами для сбора или откалывания породы, 6 – резервуар-коллектор, 7 – бокс-ангар с зарядной станцией для автономных микророботов, 8 – микроробот, 9 – шагающий робот-откалыватель, 10 – передвижной спредер для переустановки оборудования

Способ не создает замутненности и пылеобразования при взаимодействии с придонной областью. Базовое судно оснащено тремя барабанными лебедками, установленными в центре, на носу и корме базового судна, грузонесущие кабель-тросы которых оснащены оптико-волоконными каналами связи, при этом свободный конец кабель-троса барабанной лебедки, установленной в центре базового судна, соединен с захватным устройством, выполненным в виде рамы с установленными на ней двумя винтовыми движителями, с закрепленным внутри рамы ходовым винтом с левой и правой резьбой, снабженный приводом, связанным с двумя рычагами с возможностью возвратно-поступательного движения относительно оси ходового винта, при этом на концах рычагов шарнирно закреплены фиксаторы Г-образной формы с возможностью взаимодействия с транспортирующим устройством в виде грузового бункера - накопителя полезного ископаемого, корпус которого в верхней части снабжен буртиком, размещенным по всему периметру, а в нижней - устройствами горизонтирования, например домкратами, при этом добычной агрегат выполнен в виде шагающих роботов-отбойщиков, снабженных ударником и не менее чем четырьмя лапами, в виде шарнирно-рычажных механизмов с гидроцилиндрами, с шарнирно закрепленными на свободных концах грейферами и автономных роботов-сборщиков, снабженных системой регулирования плавучести, и не менее чем четырьмя водометными движителями, шарнирно установленными в направляющих с возможностью поворота не менее чем на 130 градусов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях относительно корпуса автономного робота-сборщика, выполненного с отсеком-коллектором сбора полезного ископаемого с открывающимися крышками, с размещенным в верхней части корпуса аккумуляторной батареей, гидроакустическим приемопередающим устройством, и шарнирно соединенным с передней частью корпуса механическим манипулятором с захватом-схватом на свободном конце, а так же средствами мониторинга, включающими цифровую видео камеру и прожектор, при этом автономные роботы-сборщики телекоммуникационно связаны с боксом-ангаром, разделенным на секции-ячейки, снабженным блоком питания с зарядной станцией, гидроакустическим

приемопередающим модулем и соединенным кабель-тросом с барабанной лебедкой, установленной на носу базового судна, а шагающие роботы-отбойщики соединены кабелем с распределительным устройством, размещенным на общей платформе, снабженной системой горизонтирования, например, домкратами, включающим индивидуальные катушки и трансформаторные батареи, посредством кабель-троса связанным с барабанной лебедкой, установленной на корме базового судна [95-96].

Исследователи отмечают, что концентрация ТПИ на дне на некоторых участках может достигать 40-50 кг на квадратный метр, однако очевидно и то, что ЖМК рассредоточены на дне шельфов с переменной плотностью распределения в диапазоне от 3 до 40 кг на квадратный метр. В зависимости от плотности распределения и типа ТПИ для комплекса (рисунок 2.3) возможно несколько вариантов компоновки устройств (рисунок 2.4).

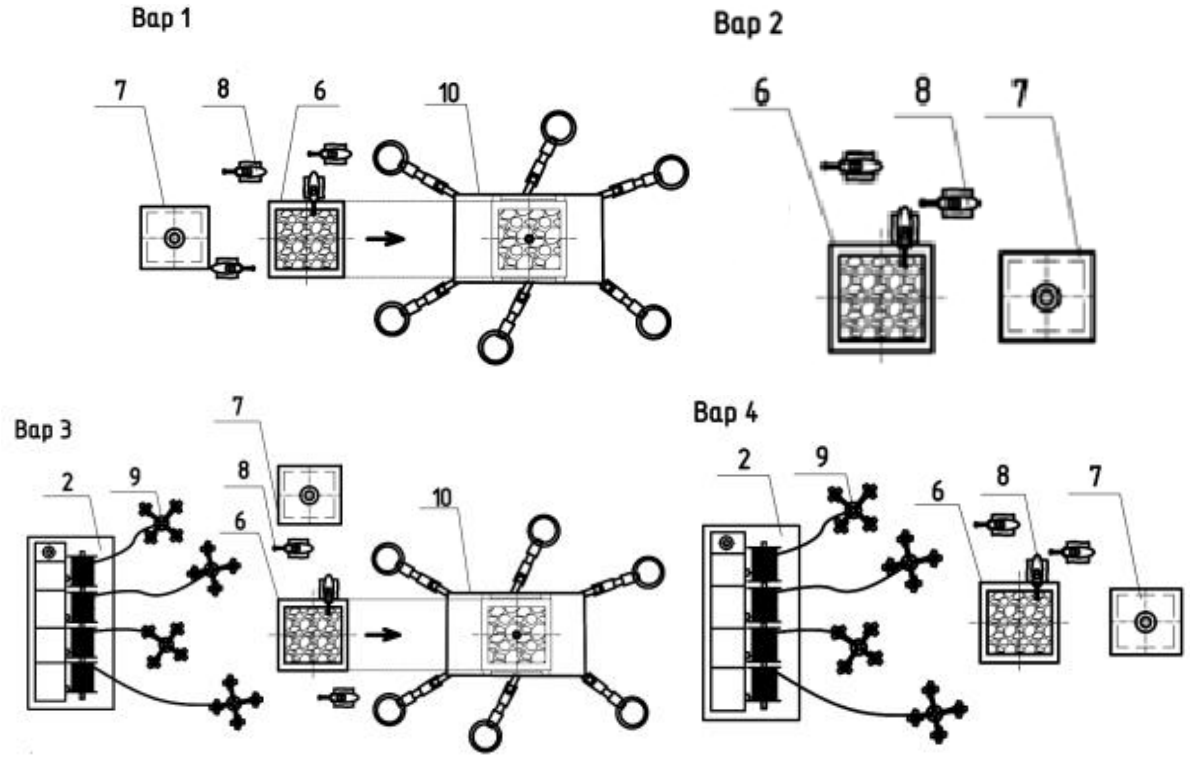


Рисунок 2.4 – Варианты добычных комплексов в зависимости от плотности распределения ЖМК/КМК (составлено автором)

1) Вариант компоновки комплекса добычи ЖМК с низкой плотностью распределения ТПИ ($q < 10$ кг/м^2): бокс-ангар 7 с автономными мини-роботами 8,

разрабатываемый ООО «ГИКО», шагающий подводный спредер для перестановки бункера 10, бункер для сбора ЖМК 6.

2) Вариант компоновки комплекса добычи ЖМК с высокой плотностью распределения ТПИ (q > 10 кг/м^2): бункер для сбора ЖМК 6, бокс-ангар 7 с автономными мини-роботами 8, разрабатываемый ООО «ГИКО».

3) Вариант компоновки комплекса добычи ЖМК, требующих разделения, или КМК с низкой плотностью распределения корок (q < 10 кг/м^2): станция 2 с шагающими роботами-отбойщиками с исполнительном органом – грейфером с ударником 9, бокс-ангар 7 с автономными мини-роботами 8, шагающий подводный спредер для перестановки бункера 10.

4) Вариант компоновки комплекса добычи ЖМК, требующих разделения, или КМК с высокой плотностью распределения корок (q > 10 кг/м^2): станция 2 с шагающими роботами-отбойщиками с исполнительном органом – грейфером с ударником 9, бокс-ангар 7 с автономными мини-роботами 8.

Для непрерывности цикла добычи ЖМК на участках с переменной плотностью необходимо применять вспомогательные устройства [92, 93] для транспортировки добычного оборудования по дну. Как видно из схем, в случае с низкой плотностью распределения ТПИ задействован шагающий спредер (рисунок 2.3, 2.4; поз. 10) для переноса недозаполненного бункера с отработанного участка на новый. Данное устройство позволяет сократить временные затраты на спускоподъемные операции, способствуя продолжению добычи придонных ТПИ. Перед началом рассмотрения параметров передвижного спредера проведен анализ времени цикла добычи для двух способов смены участка: при помощи подъемной установки, при помощи спредера.

Для комплекса с первоначальным способом смены участка «канатный подъем и передвижение судна» [97] время цикла добычи рассчитывается по формуле (2.1):

$$T_{ц1} = (n_{зап}(t_{сп} + t_{п} + t_{р}) + nt_{сб} + t_{см1})k_{нав}, \quad (2.1)$$

где $n_{зап}$ – количество заполненных бункеров на весь цикл добычи (для стандартного варианта транспортировки),

n – количество контейнеров, поднимаемых с одного участка добычи для его полной выработки (в дробном эквиваленте),

$t_{см1}$ – время, затрачиваемое на смену участка добычи, с,

$k_{нав}$ – коэффициент наведения, поправочная величина на позиционирование опускаемого оборудования равная 1,05.

$t_{сп}$ – время спуска бункера для сбора ЖМК на участок добычи, с,

$t_{п}$ – время подъема бункера для сбора ЖМК на судно, с,

$t_{р}$ – время разгрузки ЖМК на судне, с,

$t_{сб}$ – время сбора ЖМК автономными мини-роботами, с.

Время смены участка добычи для стандартного способа выражается формулой (2.2):

$$t_{см1} = \frac{l_{уч}}{v_{суд}}, \tag{2.2}$$

где $l_{уч}$ – расстояние до следующего участка, м,

$v_{суд}$ – скорость судна, м/с.

Для комплекса со сменой участка при помощи передвижного спредера (рисунок 2.4 Вар 1) время цикла добычи представлено выражением (2.3):

$$T_{ц2} = (n_{цел}(t_{сп} + t_{сб} + t_{п} + t_{р}) + t_{см2} + (t_{сп} + t_{сб} + t_{п} + t_{р}))k_{нав}, \tag{2.3}$$

где $n_{цел}$ – количество бункеров для сбора ЖМК без учета незаполненного.

Преобразуем уравнение для расчета цикла добычи при перемещении бункера шагающим спредером (2.4):

$$T_{ц2} = (n_{зап} \cdot (t_{сп.} + t_{сб.} + t_{п.} + t_{р.}) + t_{см2.}) \cdot k_{нав}, \tag{2.4}$$

Время смены участка добычи при помощи передвижного спредера представлено выражением (2.5):

$$t_{см2} = \frac{l_{уч}}{v_{спр}}(n_{об} + 1), \tag{2.5}$$

где $t_{см2}$ - время, затрачиваемое на смену участка добычи (без подъема), с,

$v_{\text{спр}}$ – скорость передвижного спредера, м/с,

$n_{\text{об}}$ – количество переставляемого оборудования на дне.

Определение применимости концепции добычи в зависимости от типа ТПИ и других критериев схематично представлено в блок-схеме на рисунке 2.5.

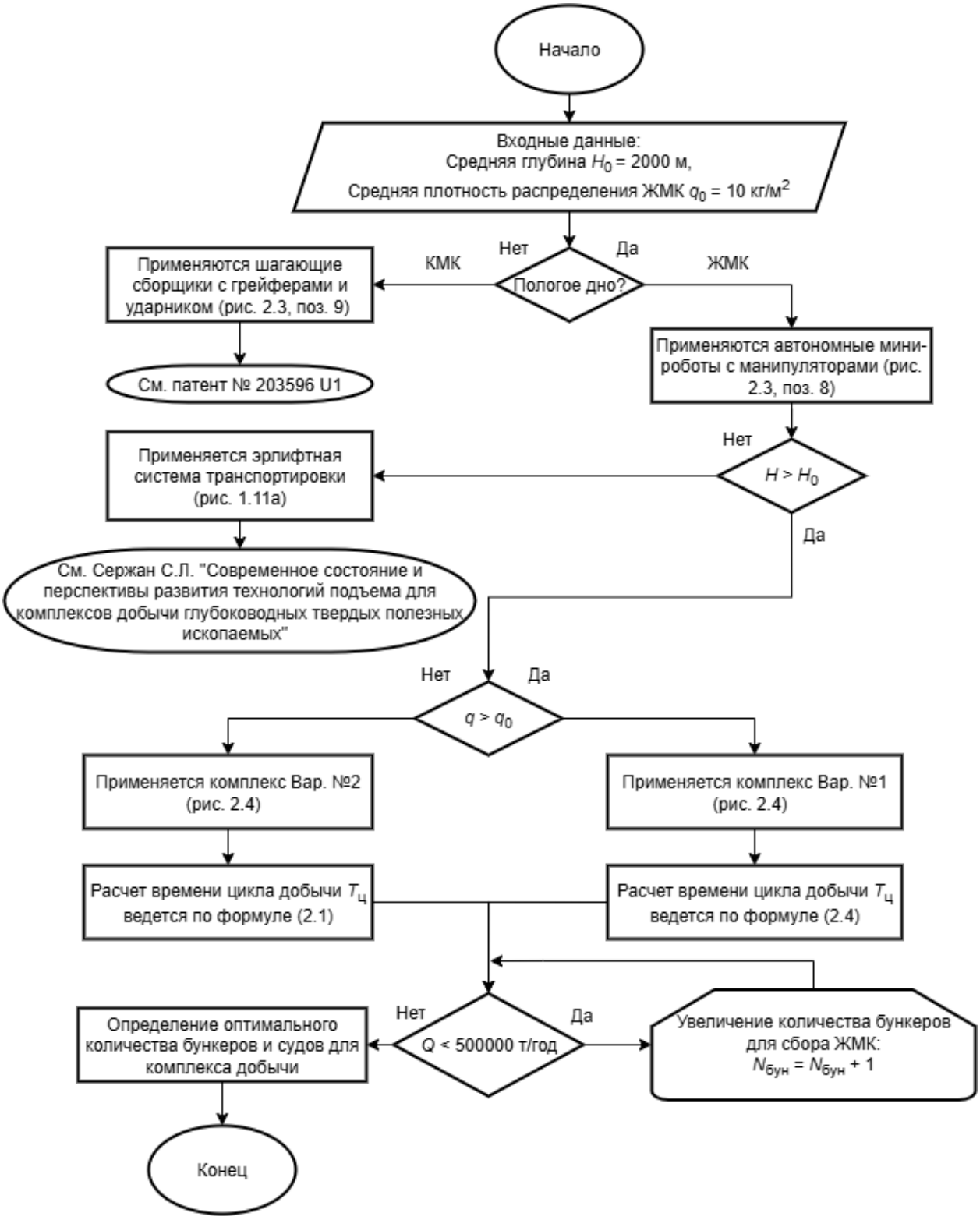


Рисунок 2.5 – Блок-схема вариантов комплексов добычи ЖМК (составлено автором)

Представленная схема отражает влияние двух критериев, плотности распределения конкреций и глубины залегания, на выбор оптимального решения по разработке ЖМК. Во входных данных задаются сравнительные величины критериев, далее следует условие залегания: в случае с ЖМК – абиссальные равнины (пологое дно), в случае с КМК – вулканотектонические гайоты [101]. Для корок применима технология с шагающими роботами-отбойщиками с исполнительным органом – грейфером с ударником [44-45]. Для сбора ЖМК применима автономная станция с мини-роботами сборщиками. Следующий блок условия – глубина залегания ЖМК, для малых глубин применима эрлифтная система добычи, для больших необходимо применять добычной комплекс с различной компоновкой оборудования (рисунок 2.3). Так, в следующем условии идет сравнение критерия плотности распределения конкреций: если он меньше 10 – то применима компоновка из рисунка 2.4 Вар 2. В случае обратного – компоновка из рисунка 2.4 Вар 1. Основное различие между вариантами состоит в применении ПС, в качестве устройства для перетаскивания оборудования. Конечный блок условия касается производительности комплекса. Если производительность не достигает целевых 500000 т/год, то следует увеличить количество заполняемых бункеров. Например, в случае с двумя бункерами: при подъеме на разгрузку первого, в это время заполняться будет второй, минуя таким образом простой оборудования.

Для сравнения способов смены участка на рисунке 2.6 построены зависимости времени смены участка от скорости передвижения применительно к двум направлениям (подъем, горизонтальное передвижение).

Предварительный анализ затрат времени на смену участка добычи разными способами показывает, что минимальная скорость передвижения спредера должна быть – 0,4 м/с, а минимальное время подъема бункера – 2 м/с.

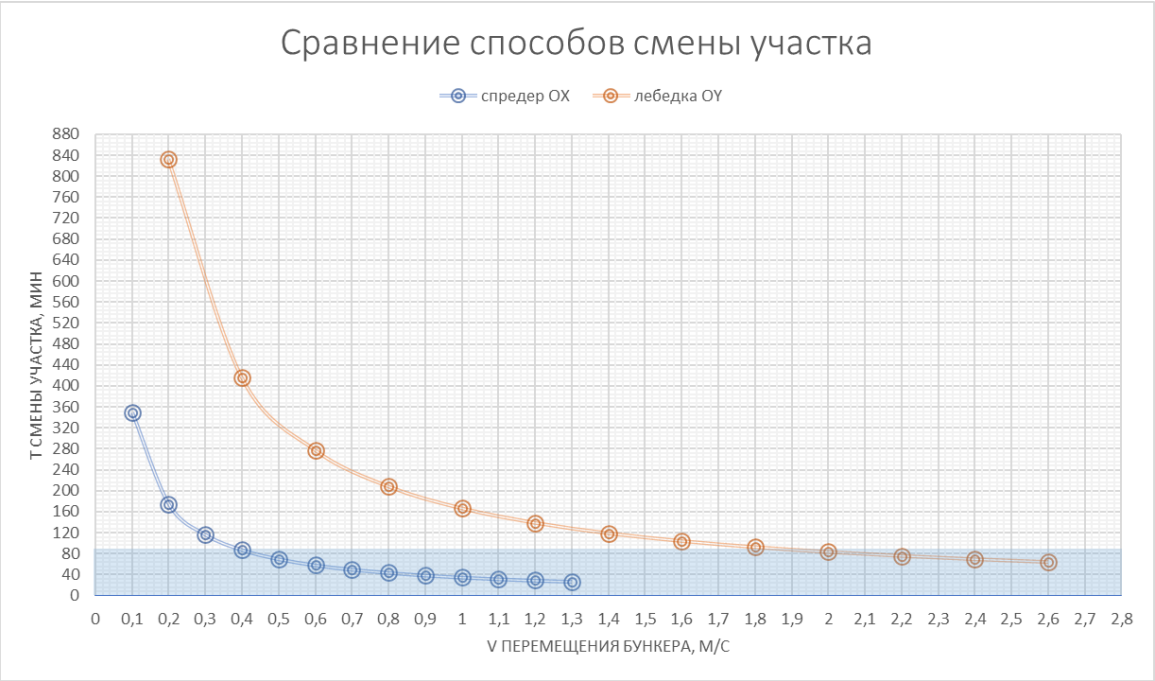


Рисунок 2.6 – Анализ времязатрат в зависимости от способа смены участка (составлено автором)

На рисунке 2.7 представлены зависимости времени цикла от скорости подъема канатной установкой для двух вариантов смены участка добычи.

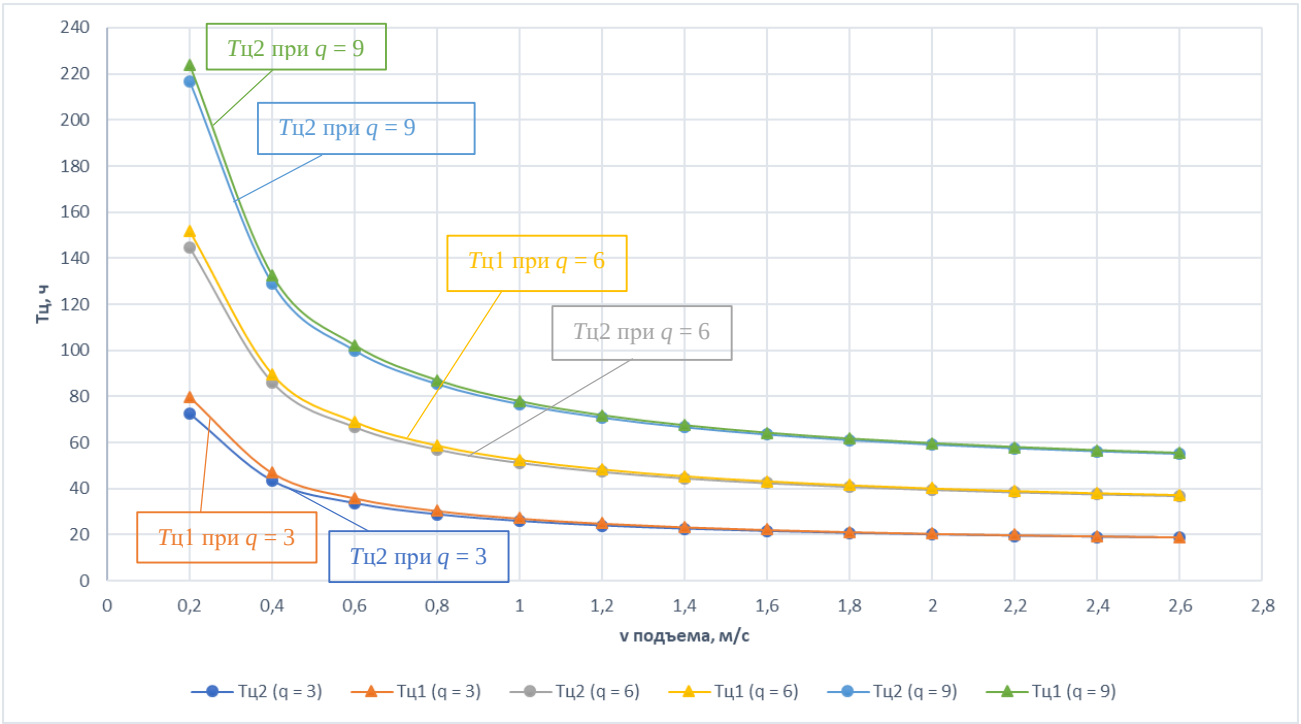


Рисунок 2.7 – Сравнение времени цикла добычи в зависимости от плотности распределения ЖМК и способа смены участка (составлено автором)

Из зависимостей времени цикла 1 и 2 при различных плотностях распределения ЖМК можно сделать вывод, что в зависимости от скорости подъема бункера канатом разрыв по времени между двумя способами смены участка начинается с 10 часов и по мере увеличения скорости подъема контейнера канатной установкой сокращается до 1 часа. Однако, несмотря на сокращение разрыва по времени, растет количество собираемых ЖМК, за счет продолжения сбора, минуя подъем, разгрузку и опускание бункера. В свою очередь, при увеличении плотности распределения ЖМК вырастает время цикла пропорционально возрастанию количеству собранных ЖМК с участка. Для более детального рассмотрения параметров комплекса необходимо уделить внимание расчету каждой временной характеристики, входящей в цикл добычи.

По расчетам разработчиков системы «РОЙ», состоящей из 512 мини-сборщиков, время сбора при плотности распределения конкреций на метр q = 12 кг/м^2 с учетом 60% сбора время заполнения бункеров полезной массой 50 и 100 тонн составляет соответственно: 93 минуты и 186 минут.

2.2 Обоснование параметров кабель-троса

В разработанной технологии важным элементом является кабель-трос [58], где указано наличие нескольких кабель-тросов для выполнения функций электроснабжения установок и для спускоподъемных операций. Лебедки и электрическое оборудование на судне в данной работе не рассматриваются, так как выходят за рамки расчета критериев производительности, а также, поскольку в технологии применяются судна со стандартным набором судового оборудования.

Как было показано, цикл подъема играет ключевую роль в расчете основного параметра, с имеющимися потребностями делается заключение о возможности использования тросового подъема. В таблице 2.2 даны основные параметры грузонесущих кабель-тросов, однако по заказу ООО «ГИКО» АО «Центр Перспективных Технологий» выполнил проект грузонесущего кабель-троса с арамидной оплеткой (приложение В).

Таблица 2.2 – Параметры грузонесущих кабель-тросов

Характеристика	Значение	
Материал троса	СВМПЭ	
Диаметр каната, мм	56	
Суммарное разрывное усилие, Н	3200000	
Масса подъемной рамы, кг	2000	
Масса бункера, кг	1000	900
Масса груза, кг	50000	30000
Общий вес на конце каната при максимальной глубине	519930	322749
Запас прочности	6,15	9,91

Расчет прочности кабель-троса необходимо проводить с использованием выражений и формул, представленных ниже. Для подъема придонного агрегата с заполненным конкрециями резервуаром необходимо использовать кабель – трос из арамидного волокна. Преимущества кабель-троса: устойчивость к растяжению (меньше 1,5%), очень высокая прочность, легкость в сплетании, водонепроницаемость, устойчивость к воздействию ультрафиолетом и повышенная износостойкость.

Необходимо определить сколько полезной массы руды способен поднять такой канат. Максимальная нагрузка на канат рассчитывается по формуле (1.2). Для того, чтобы силы сопротивления при подъеме оказывали меньшую нагрузку на канат целесообразно применение сферического обтекаемого корпуса. Сила сопротивления при подъеме цилиндрического контейнера со сферическим обтекателем при условии подъема со скоростью 3 м/с рассчитывается по формуле (1.4). Сила сопротивления каната при подъеме рассчитывается по формуле (2.6):

$$F_к = c_k \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V^{\frac{2}{3}}, \quad (2.6)$$

где c_k – коэффициент гидродинамического сопротивления каната,

ρ – плотность воды, кг/м^3,

v – скорость канатного подъема, м/с,

V – объем каната, м^3.

Для того чтобы определить динамическую нагрузку силы натяжения, необходимо рассчитать максимальное значение динамической силы натяжения при начальной скорости рывка: определяется в соответствии с методикой в справочной литературе «Судовые устройства» [2].

Составляющая динамического усилия (1.3) скорость звука вдоль связи для продольных колебаний груза на упругой гибкой нити рассчитывается, как:

$$a = \sqrt{\frac{ES_c l}{m_t}}, \tag{2.7}$$

где E – модуль упругости материала каната, Па,

S_c – площадь поперечного сечения каната, м^2,

l – длина каната, м,

m_t – масса каната в воде, кг.

Специалистами подводных исследовательских суден установлено, что запас прочности подъемного каната может быть в пределах 2-5 при условии его осмотров и частой замены. В целях увеличения срока службы каната, коэффициент запаса прочности может быть увеличен. Для расчета полезной массы конкреций запас прочности принимается: k = 2.

С использованием указанных выше методик и формул (1.2 – 1.4), (2.6 - 2.7) для каната из кевлара, диаметром 57 мм (Приложение В):

$$F_r = 1250000 - 264064 - 98100 - 40734 - 981 - 9950 = 836171 \text{ (Н)},$$

где 98,1 кН – вес бункера, а 836 кН – полезный вес ЖМК. Таким образом, максимально поднимаемый вес контейнера с ЖМК составляет не превышает 1000 кН, а диаметр каната не превышает 0,06 метров.

2.3 Расчет параметров гидроцилиндров и определение схемы шагания

Как уже было сказано ранее, в случае с участками добычи малой плотности распределения ЖМК, для перемещения вспомогательного оборудования целесообразно использовать шагающий спредер для переустановки с участка на участок, например, бокса-ангара (рисунок 2.8).

Рисунок 2.8 – 3D-модель подводного спредера шагающего типа для переустановки придонного оборудования добычного комплекса

Ходовой частью спредера являются рукояти-манипуляторы, приводимые в движение гидроцилиндрами [82-83]. Конструкция предусматривает использование гидравлической насосной станции, располагаемой на верхней части спредера. Для дальнейшего расчета скорости передвижения ПС представлена кинематика рукоятей – манипуляторов, в зависимости от осуществляемой гидроцилиндрами операции (рисунок 2.9).

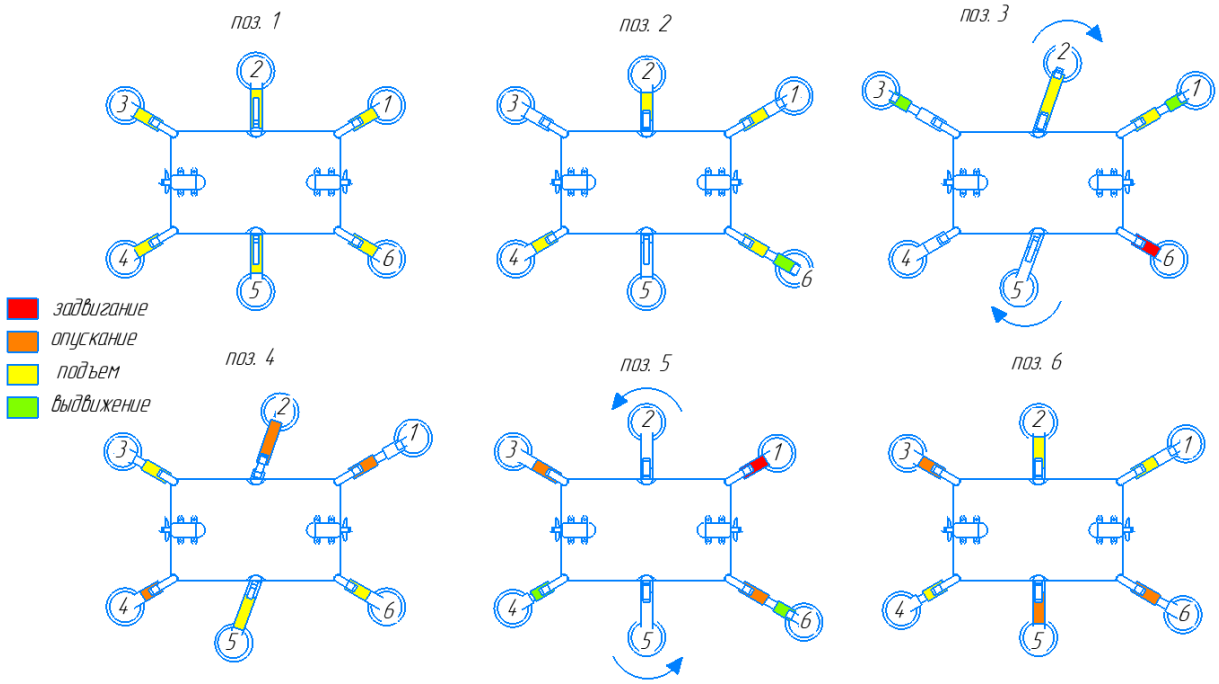


Рисунок 2.9 – Алгоритм шагания спредера для переустановки оборудования

Для определения рабочих параметров насоса необходимо применять схематично представленную характеристику насоса с учетом его регулирования и сопротивления гидросети (рисунок 2.10).

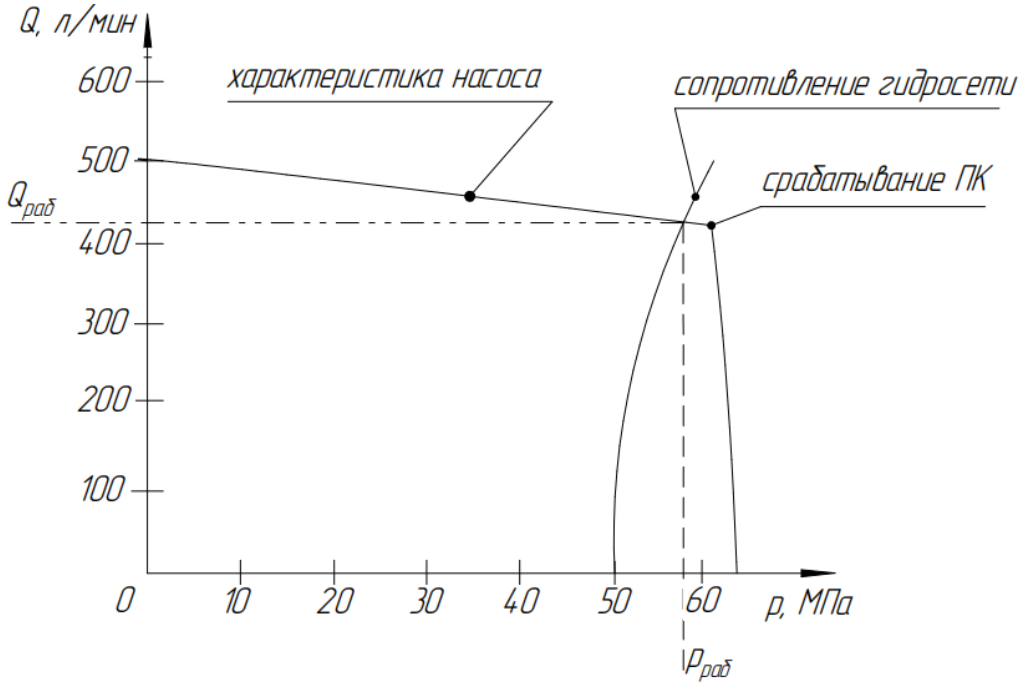


Рисунок 2.10 – Рабочий режим насоса и его регулирование

Для работы на большой глубине необходимо подобрать насос с расходом, способным обеспечивать быстрое выдвижение штока гидроцилиндра и, соответственно, быстрое передвижение подводного аппарата. Для первоначальных расчетов подобран насос, подходящий по давлению и с максимально большим расходом. Радиально-поршневой регулируемый насос 50 НРР 500Г имеет характеристики, подходящие под выполнение расчета параметров гидроцилиндров, приведенные в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Характеристики насоса серии 50 НРР

Наименование	Рабочий объем $см^3$	Подача (расход) л/мин номин.	Давление МПа		Масса, кг
			номин.	макс.	
50 НРР 500Г	500	423	50	63	524

По представленной на рисунке 2.10 характеристике насоса и параметрам из таблицы 2.3 предварительно установлены величины рабочего расхода $Q_{раб}$ = 423 л/мин и рабочего давления $p_{раб}$ = 58 МПа.

Бункер для сбора ЖМК, грузоподъемностью 85 тонн, с габаритами 3х2х5 м предположительно имеет каркас из титана толщиной 50 мм и массой до 10 тонн. Объем вытесненной жидкости для бункера с таким каркасом составляет – 2,5 м^3.

Требуемое суммарное усилие, воздействующее на рычаги-манипуляторы подводного спредера при вертикальном выдвижении гидроцилиндра (позиция 1, рисунок 2.9) определяется выражением (2.8):

$$F^{y}_{\text{сум. усил.}} = gk(m - \rho V) = 1133515 \text{ (Н)}, \quad (2.8)$$

где m – сумма веса конкреций и веса бункера, кг,

ρ – плотность морской воды, кг/м^3,

V – объем вытесненной жидкости подводным аппаратом, м^3,

k – коэффициент массы спредера (1,25).

Количество рычагов передвижения N = 6, требуемая толкающая сила штока гидроцилиндра подъема $F^{y}_{\text{рычаг}}$ будет равняться усилию, прилагаемому к рычагу при количестве точек опоры $N_{оп}$ = 3. Количество точек опоры выбрано исходя из требуемого минимального количества «лап» при подъеме остальных с сохранением устойчивого положения спредера. Таким образом, в момент поднятия 3-х «лап», на оставшиеся приходится сумма всех масс под которую и будут рассчитаны гидроцилиндры.

$$F^{y}_{\text{рычаг}} = \frac{F^{y}_{\text{сум. усил.}}}{3} + F_{\text{гидр}}, \quad (2.9)$$

Важной составляющей расчета силы тяги является расчет силы гидродинамического сопротивления, действующего противоположно направлению движения, рассчитываемое по формуле (1.4). Необходимой частью расчетов гидродинамической силы является установление коэффициента гидродинамического сопротивления c_x. Для его определения необходимо проведение экспериментального исследования, как правило, представляющее собой измерение силовой характеристики испытуемого объекта в нагнетаемом

потоке жидкости. Этот параметр является ключевым фактором, ограничивающим скорость подводных аппаратов, поскольку требует затрат энергии для его преодоления. В упрощенном представлении гидродинамическое сопротивление пропорционально квадрату скорости аппарата [98].

Способы уменьшения гидродинамического сопротивления:

1) Оптимизация формы корпуса: гидродинамическая обтекаемость позволяет уменьшить лобовое сопротивление. Например, форма в виде капли воды минимизирует возмущения.

2) Материалы и покрытия: использование специальных гладких покрытий или даже активных технологий (например, микроскопических пузырьков воздуха) снижает трение.

3) Снижение турбулентности: Плавные переходы между элементами конструкции, а также использование стабилизаторов потока позволяют снизить индуцированное сопротивление.

4) Скорость движения: Оптимизация маршрута и поддержание экономичной скорости помогают снизить общий расход энергии.

Существуют несколько типовых способов определения коэффициента c_x:

1. Теоретические расчеты: используются для простых форм (шар, цилиндр, плоскость) с известными формулами.

2. Эксперименты в гидродинамической трубе: измеряется сила сопротивления при различных скоростях, затем вычисляется c_x .

3. Численное моделирование: используются компьютерные симуляции, чтобы предсказать c_x для сложных геометрий.

4. Эмпирические данные: для типовых форм коэффициенты сопротивления уже известны из предыдущих исследований.

В рамках теоретического обоснования влияния сил гидродинамического сопротивления на производительность комплекса, значение c_x выбрано согласно справочной литературе, как для конструкции с прямоугольным сечением. В главе 3 будет проведено подробное исследование коэффициента c_x с использованием

нескольких объектов разного сечения, тензодатчика для снятия показаний силы, прикладываемой к объекту при движении его в резервуаре, заполненном водой.

Для первоначального расчета коэффициент сопротивления c_x согласно справочной литературе [2] принят 1,1. Подставив в уравнение (2.9) известные данные [Приложение В] рассчитаем требуемую толкающую силу штока гидроцилиндра подъема:

$$F^{y}_{\text{рычаг}} = \frac{1133515}{3} + 1{,}1 \cdot 7{,}5 \cdot 1025 \cdot \frac{3^2}{2} = 377838 + 38053 = 415891 \text{ (Н)}$$

Требуемые минимальные значения диаметра поршня и штока гидроцилиндра определяются соотношением (2.10-2.11):

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F^{y}_{\text{рычаг}}}{\pi \cdot p_{\text{раб}}}} \cdot k = \sqrt{\frac{4 \cdot 415891}{\pi \cdot 58000000}} \cdot 1{,}1 = 0{,}105(м) = 105(\text{мм}), \qquad (2.10)$$

где $p_{\text{раб}}$ – давление в гидросистеме, Па.

$$d = D \cdot 0{,}7 = 105 \cdot 0{,}7 = 74(\text{мм}), \qquad (2.11)$$

Длина хода поршня L - 1 метр. Объем поршневой полости определяется соотношением (2.12):

$$V = L\pi R^2 = 1 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}052^2 = 0{,}008(\text{м}^3), \qquad (2.12)$$

Скорости движения поршня при подаче жидкости в поршневую $v_{\text{п}}$ и штоковую $v_{\text{ш}}$ полости (при учете коэффициента мощности $k_{\text{м}}$ = 0,85 и коэффициента потери времени на разгон и торможение k_t = 0,75) рассчитывается как (2.13):

$$v_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{н}} \cdot k_{\text{м}} \cdot k_t}{S_{\text{п}}} = \frac{4 \cdot 0{,}0141 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}75}{3{,}14 \cdot 0,105^2} = 1{,}04(\text{м/с}), \qquad (2.13)$$

где $Q_{\text{н}}$ – подача 2-х насосов, подключенных параллельно, м^3/с,

$S_{\text{п}}$ – площадь поршня, м^2,

$k_{\text{м}}$ – коэффициент мощности,

k_t – коэффициент потери времени на разгон и торможение.

$$v_{\text{ш}} = \frac{Q_{\text{н}} \cdot k_{\text{м}} \cdot k_t}{S_{\text{п}} - S_{\text{ш}}} = \frac{4 \cdot 0{,}0141 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}75}{3{,}14 \cdot (0,105^2 - 0{,}074^2)} = 2{,}03(\text{м/с}), \qquad (2.14)$$

где $S_{\text{ш}}$ – площадь штока, м^2.

Полученная скорость выдвижения гидроцилиндра при подаче жидкости в штоковую или поршневую часть позволяет рассчитать общее время передвижения подвижного спредера на 2 метра, то есть определить его скорость. В табл. 2.4 представлено описание схемы передвижения шагающего подводного аппарата и время, затрачиваемое на движение гидроцилиндров. При подаче жидкости в поршневую часть, время вычисляется по формуле (2.15). Аналогично вычисляется время при подаче жидкости в штоковую часть гидроцилиндра.

$$t_{\text{п}} = \frac{L_{\text{п}}}{v_{\text{п}}} = 0{,}97\ (\text{с}), \qquad (2.15)$$

Таблица 2.4 – Описание схемы шагания ПС (составлено автором)

Позиция	Вид движения рычагов-манипуляторов ПС	Расчетное время, затрачиваемое на движение
1	Вертикальный подъем рычагов 1 – 6.	$t_1 = 0{,}97(\text{с})$
2	Подъем, выдвижение, опускание рычага 6 → подъем рычагов 1, 2, 4.	$t_2 = 0{,}97 + 0{,}97 + 0{,}49 + 0{,}97 = 3{,}4(\text{с})$
3	Задвигание рычага 6 и выдвижение рычага 3, поворот рычага 5 в направлении движения, выдвижение рычагов 1, 2 в поднятом состоянии.	$t_3 = 0{,}97 + 0{,}97 = 1{,}94\ (\text{с})$
4	Опускание рычагов 1, 2, 4 → подъем рычагов 3, 5, 6.	$t_4 = 0{,}97 + 0{,}49 = 1{,}46(\text{с})$
5	Задвигание рычага 1, выдвижение рычага 4, поворот рычага 2 в направлении движения → рычаги 3, 5, 6 принимают положения для следующего движения	$t_5 = 0{,}97 + 0{,}97 = 1{,}94(\text{с})$
6	Опускание рычагов 3, 5, 6 → подъем рычагов 1, 2, 4. Повтор цикла движения с позиции 2.	$t_6 = 0{,}97(\text{с})$
Полный цикл шагания		$t_{\text{шаг}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 = 10{,}64(\text{с})$

Таким образом, определены варианты параметров гидроцилиндров и насосов, при эксплуатации которых скорость шагания передвижного устройства составляет 0,188 м/с. Для того, чтобы переместить коллектор или бокс-ангар с зарядной станцией на 700 метров понадобится 62 минуты без учета времени захвата вспомогательного оборудования.

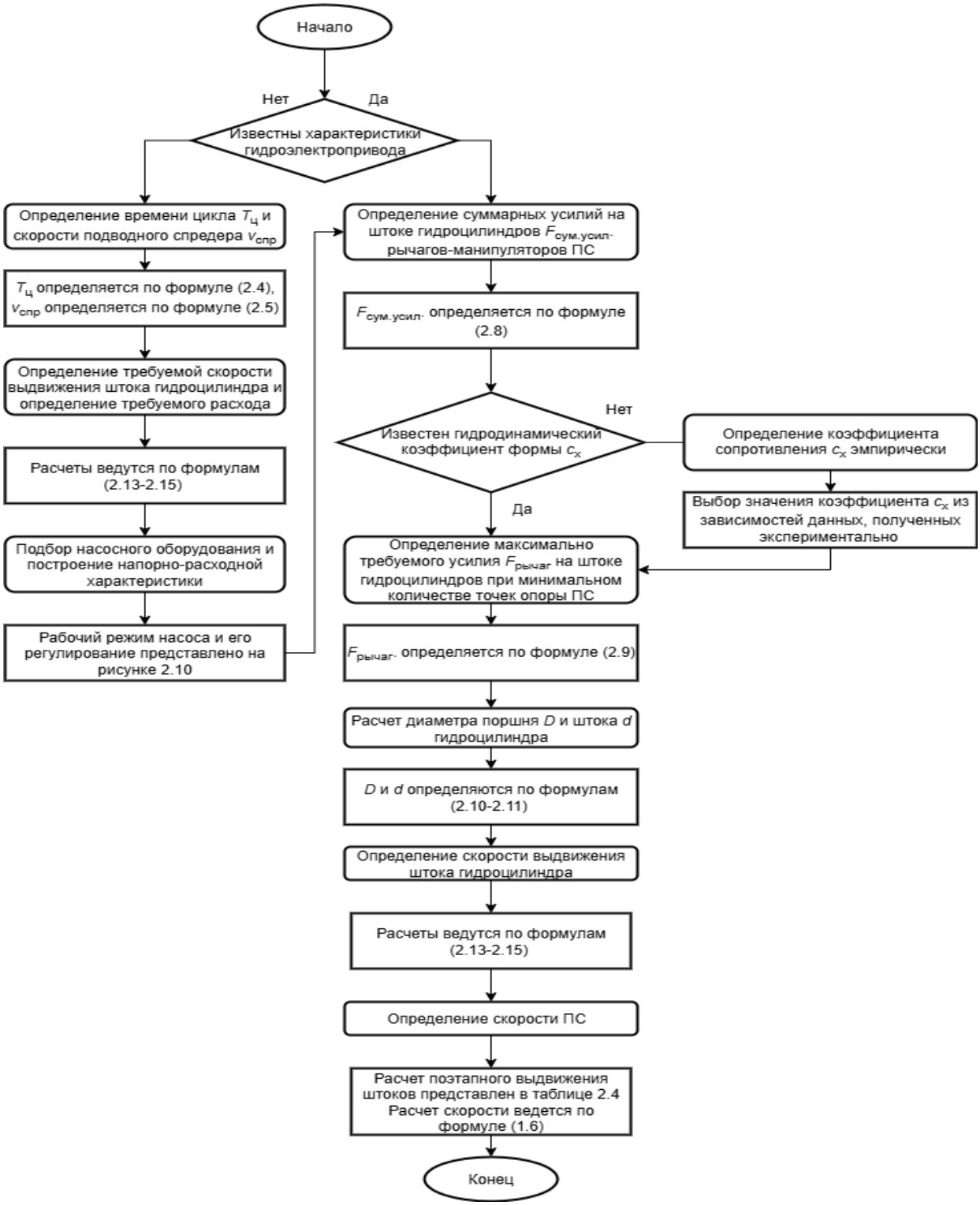


Рисунок 2.11 – Блок-схема определения параметров подводного спредера

В представленной методике расчета скорости ПС делается акцент на влиянии гидродинамической силы, векторно направленной противоположно передвижению устройства. В связи с этим, гидравлические характеристики принимаются исходя из известных параметров существующего насоса. Однако, известны методики расчетов при проектировании устройств и подборе насосов, где первоначальной задачей является определение требуемого расхода и давления. В рамках выполненной диссертационной работы на рисунке 2.11 представлена блок-схема определения параметров ПС, включающая обе методики расчета.

В предыдущих подразделах были рассмотрены канатная система транспортировки и определение скорости ПС. Дополнительной задачей в процессе спуска оборудования добычного комплекса на дно является точное наведение бункеров для сбора ЖМК, автономной станции с мини-роботами и ПС в заданную точку, согласно предварительной разметке участка [102-103]. С этой целью, в следующем подразделе будет проведен расчет подруливающих устройств рамы с ходовыми винтами (рисунок 2.3, позиция 4).

2.4 Расчет подруливающих устройств

Как указано выше для центрирования захватной рамы под бункер или другое вспомогательное оборудование необходимо наличие двух винтовых движителей: центрирование по OX и OY. Поскольку пропускная способность кабель-троса составляет 11 кВт, то на один движитель с электродвигателем выделяется максимальное значение мощности 5,5 кВт (или 11кВт при условии поочередной работы).

Первоначально необходимо рассчитать упор каждого гребного винта (рисунок 2.12) по отношению к корпусу рамы. В целях упрощения расчета сечения рамы было принято считать, что площадь воздействия винта №1 S_1 составляет 9 м^2 (3 метра – ширина, 3 метра – высота), а площадь воздействия винта №2 S_2 – 15 м^2 (5 метров – длина, 3 метра – высота).

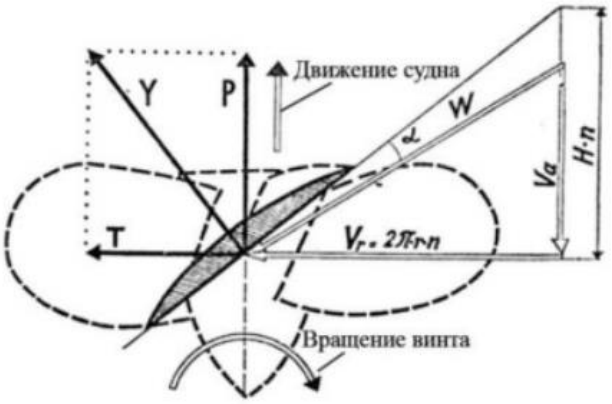


Рисунок 2.12 – Схема сил и скоростей на лопасти винта (правого вращения)

Коэффициент сопротивления прямоугольного сечения $c_{\text{х}}$, согласно справочной литературе [2], составляет 1,28. Упор винта $T_{\text{у}}$ рассчитывается по формуле (2.16):

$$T_{\text{у}} = \frac{F_{\text{т}}}{1-t}, \tag{2.16}$$

где $F_{\text{т}}$ – сила тяги, численно равна и противоположна направлена сопротивлению корпуса объекта при движении в воде $F_{\text{гидр}}$, Н.

t – коэффициент засасывания (0,06).

Согласно [2] по формуле (2.17) рассчитывается величина полезной мощности *EPS*. Ориентировочное значение мощности $N_{\text{о}}$ силовой установки можно получить из соотношения (2.18), приняв пропульсивный коэффициент η = 0,62, принимаемый в такой величине для судов у которых коэффициент общей полноты δ > 0,74.

$$EPS = F_{\text{т}} v, \tag{2.17}$$

где v – ориентировочная скорость перемещения рамы с грузом, м/с.

$$N_{\text{о}} = \frac{EPS}{\eta}, \tag{2.18}$$

Для расчета упора гидравлического винта построен чертеж (рисунок 2.13), схематично представляющий силы, действующие на спускаемый кабель-тросом контейнер с захватной рамой при отклонении от центра спуска на определенное угловое значение.

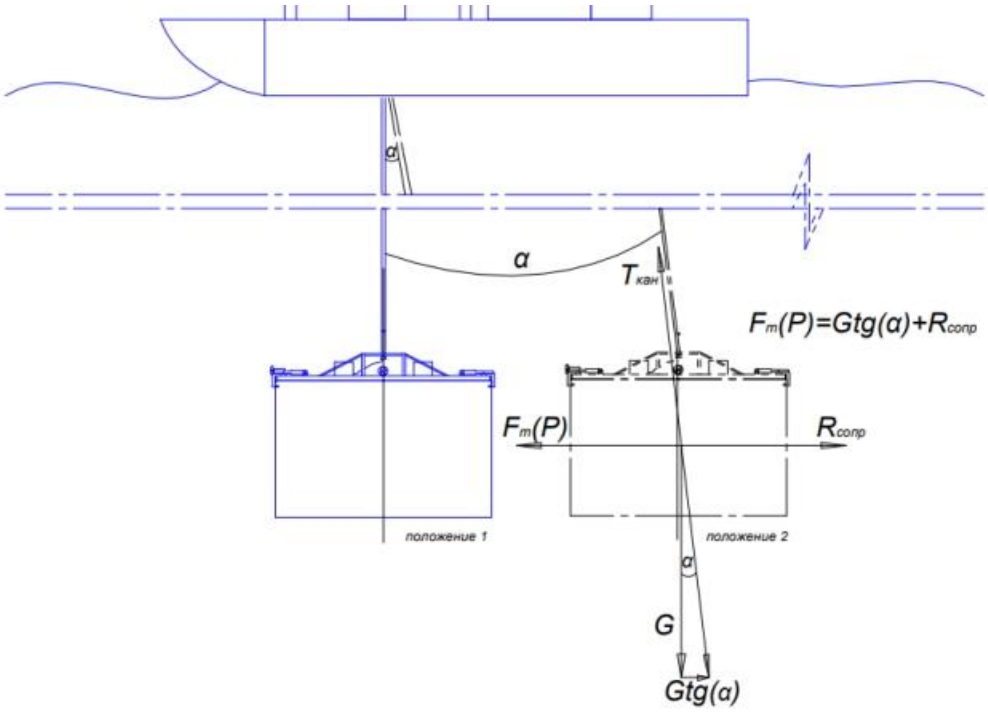


Рисунок 2.13 – План сил для контейнера с захватной рамой

В таблице 2.5 представлены рассчитанные значения сопротивлений движению и упор для каждого винта, а также полезная и ориентировочная мощности для скоростей передвижения в задаваемом диапазоне от 0,2 до 1,2 м/с. Угол α для расчета был принят 4 градуса. Расчет требуемого упора гребного винта в заданных условиях был произведен по формуле (2.19):

$$T_{\text{у}} = \frac{F_{\text{сопр.}}}{1-t} + G\tan\alpha\,, \tag{2.19}$$

где G – вес спускаемой конструкции (157 кН), Н,

α – угол отклонения кабель-троса от центра (4^0),

t – коэффициент засасывания.

Таблица 2.5 – Рассчитанные характеристики упора винта и ориентировочной мощности двигателя

v	$F_{\text{гидр1}}$	$F_{\text{гидр2}}$	$T_{\text{у1}}$	$T_{\text{у2}}$	EPS_1	EPS_2	$N_{\text{о1}}$	$N_{\text{о2}}$
м/с	Н	Н	Н	Н	кВт	кВт	кВт	кВт
0,2	**2362**	**3936**	**13484**	**15159**	**2,70**	**3,03**	**4,35**	**4,89**
0,4	4723	7872	15996	19346	6,40	7,74	10,32	12,48

Продолжение таблицы 2.5

0,6	7085	11808	18509	23533	11,11	14,12	17,91	22,77
0,8	9446	15744	21021	27720	16,82	22,18	27,12	35,77
1,0	11808	19680	23533	31908	23,53	31,91	37,96	51,46
1,2	14170	23616	26046	36095	31,25	43,31	50,41	69,86

Как видно из полученных значений, чтобы уложиться в мощность 5 кВт на 1 винт, необходимо ограничить скоростной диапазон передвижения захватной рамы до 0,2 м/с (чем больше скорость, тем больше сопротивление передвижению, а значит и затрачиваемая мощность). Таким образом, необходим винтовой движитель мощностью 5кВт и согласно формуле (2.20) диаметр такого винта при частоте вращения 50 об/с составляет:

$$D_{\text{в}} = \sqrt[4]{\frac{T_{\text{у}}}{k_p \cdot \rho \cdot n^2}} = \sqrt[4]{\frac{15200}{0{,}35 \cdot 1025 \cdot 50^2}} = \approx 0{,}3(\text{м}), \qquad (2.20)$$

где k_p - коэффициент упора (0,35),

ρ – плотность морской воды, кг/м^3,

n – частота вращения винта, об/с.

2.5 Анализ производительности добычного комплекса

В данном подразделе представлена методика расчета производительности добычного комплекса от требуемого значения. Годовая производительность добычного комплекса по массе добываемых ЖМК (1.1) в простейшем виде представлена выражением (2.21):

$$Q_{\text{год}} = \frac{G}{T_{\text{ц}}} \cdot t_{\frac{\text{ч}}{\text{год}}}, \qquad (2.21)$$

где $t_{\text{ч/год}}$ – рабочие часы в году (6800 часов).

Для подробного анализа производительности, где в качестве сборщиков используется система «РОЙ» имеется методика расчета параметров обратным ходом от требуемой производительности к требуемому минимальному времени цикла сбора. Получившиеся значения представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Основные параметры глубоководного добычного комплекса (составлено автором)

Параметры	**Значение**				
Количество рабочих дней в году	340				
Время работы, ч/сут	20				
Годовой рабочий фонд, ч	6800				
Плотность распределения ЖМК, кг/м2	12				
Высота подъема, м	4000				
Требуемая производительность, млн. т/год	2	3	2,5	0,3	0,3
Количество сборщиков (пчел), шт	250	250	250	250	250
Параметры участка сбора, ширина стороны квадрата, м	700	700	700	700	700
Количество участков для реализации заданной производительности	340,1	510,2	425,2	51,0	51,0
Время отработки одного квадрата, час	20,0	13,3	16,0	133,3	133,3
Площадь работы одного сборщика в заданном участке, м2	1960	1960	1960	1960	1960
Количество руды на 1 участке, т	5880	5880	5880	5880	5880
Требуемая производительность одного сборщика, т/час	1,18	1,76	1,47	0,18	0,18
Требуемая скорость отработки площади, м2/ч	98,04	147,06	122,55	14,71	14,71
то же, $м^2$/мин	1,63	2,45	2,04	0,25	0,25
Объем бункера сборщика, кг	20	20	20	20	20
Количество циклов/ч	58,82	88,24	73,53	8,82	8,82
Время цикла 1 сборщика, мин	1,02	0,68	0,82	6,80	6,80
Принимаемая грузоподъемность бункера, т	50,0	50,0	50,0	50,0	30,0
Количество циклов для наполнения бункера	10	10	10	10	6
Время наполнения бункера, мин	10,2	6,8	8,16	68	40,8
Скорость подъема, м/с	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5
Время цикла 1 бункера (наполнение, подъем и опускание), час	1,7	1,7	1,7	2,7	1,7

Продолжение таблицы 2.6

Количество циклов в году	2939,8	3039,1	2998,6	1890,2	3086,8
Требуемый вес руды в одном подъеме, т	680,3	987,1	833,7	158,7	97,2
Объем одного бункера, м3	75,0	75,0	75,0	75,0	45,0
Требуемый часовой подъем, т/час	294,12	441,18	367,65	44,12	44,12
Количество бункеров	14,0	20,0	17,0	4,0	4,0

На участках океана, окруженных островами, возможно использование одноканатного подъема, когда контейнер висит на одном кабель-тросе и наводится специальными движителями в определенную точку дна, при этом рекомендуемые скорости подъема не должны превышать 10…50 м/мин.

Режим работы выбран стандартным, по которому работают действующие горнорудные предприятия: 340 дней в году, по 18-20 часов в сутки. Невозможность работы непрерывно обусловлена требованием к ежесменному осмотру подъемной машины, еженедельным, ежемесячным и ежегодному техническому обслуживанию всего оборудования и другими технологическими операциями, которые необходимо производить для поддержания работоспособного состояния технических средств [88, 94].

Таким образом получаем, что годовой фонд рабочего времени составляет 6800 часов в году. Откуда требуемая часовая производительность комплекса рассчитывается по формуле (2.22):

$$Q_{\text{ч}} = \frac{Q_{\text{год}} \cdot 10^6}{T_{\text{год}}}, \qquad (2.22)$$

где $Q_{\text{год}}$ – годовая производительность, млн. т/год,

$T_{\text{год}}$ – годовой фонд рабочего времени, ч.

Параметры участка сбора определяются следующими исходными данными: плотность распределения ЖМК 12 кг/м^2 и глубина залегания ЖМК, которая является высотой подъема – 4000 м.

Исходя из возможностей эхолокационных реперов, максимальная площадь отработки для одного комплекса должна входить в квадрат площади 700х700 м.

Данные о плотности распределения и размеру максимальной площади отработки позволяют сказать, что для достижения производительности 0,3 млн. т/год ЖМК потребуется отработка 51 участка в год. Исходя из годового фронта работ 6800 ч один участок 700х700 должен быть отработан за 134 часа, а это означает, что примерно 1 раз в неделю потребуется перемещение бункеров с одного квадрата на другой.

Достижение большей годовой производительности возможно путем увеличения скорости отработки каждого квадрата (как указано в таблице 2.6) или увеличение количества оборудования: сборщиков, приемных бункеров и судов обеспечения, т. е. каждый комплекс работает на своей площади сбора 700х700.

Также стоит отметить, что существуют богатые месторождения ЖМК, на которых плотность распределения может достигать 20 и 40 кг/м^2. Увеличение плотности распределения ЖМК приведет к более долгой отработки каждого квадрата, а соответственно и к меньшим передвижениям бункера, так как количество отрабатываемых участков для достижения требуемой годовой производительности будет меньше.

По найденной общей часовой производительности находится требуемая часовая производительность 1 сборщика по формуле (2.23):

$$Q_{\text{ч.сб}} = \frac{Q_{\text{ч}}}{n_{\text{сб}}}, \tag{2.23}$$

где $n_{\text{сб}}$ – принятое количество сборщиков.

По найденной часовой производительности сборщика определяется скорость сбора, которая позволит обеспечить заданную производительность по формуле (2.24):

$$v_{\text{ч.сб}} = \frac{1000 \cdot Q_{\text{ч.сб}}}{60 \cdot q}, \tag{2.24}$$

где q– плотность распределения ЖМК, кг/м^2, ($q = 12$ кг/м^2).

Также, зная часовую производительность и предварительно выбранный объем местного бункера сборщика, можно определить требуемое количество циклов сбора в час одного сборщика по формуле (2.25).

$$N_{\text{ц.сб}} = \frac{Q_{\text{ч.сб}} \cdot 1000}{P_{\text{сб}}}, \quad (2.25)$$

где $P_{\text{сб}}$ – грузоподъемность местного бункера сборщика, кг, ($P_{\text{сб}} = 20$ кг).

Откуда, требуемые затраты на 1 цикл определяются по формуле (2.25):

$$\text{Т}_{\text{ц.сб}} = \frac{60}{N_{\text{ц.сб}}}, \quad (2.26)$$

Для того, чтобы понять сколько циклов необходимо для наполнения 1 бункера необходимо понимать его грузоподъемность. По подобранному подъемному тросу известно, что нагрузка на конце троса не должна составлять до 100 т, а учитывая вес самого бункера, а также плотность ЖМК, грузоподъемность бункера следует принимать не более 50 т.

По предварительно заданному объему бункера и грузоподъемности каждого сборщика 20 кг можно выйти на количество циклов сбора для наполнения бункера по формуле (2.27):

$$N_{\text{ц.б}} = \frac{1000 P_{\text{б}}}{n_{\text{сб}} P_{\text{сб}}}, \quad (2.27)$$

где $P_{\text{б}}$ – предварительно выбранная грузоподъемность бункера, т.

Зная количество циклов, а также требуемого времени цикла 1 сбора, требуемое время для наполнения 1 бункера найдем по формуле (2.28):

$$t_{\text{зап.б}} = 60 N_{\text{ц.б}} \text{Т}_{\text{ц.сб}}, \quad (2.28)$$

Общее время цикла состоит из времени наполнения бункера $t_{\text{зап.б}}$, его подъем и опускание для последующего наполнения.

Время подъема и опускания бункера будет напрямую зависит от скорости намотки троса и ограничивается технической способностью лебедки, из практики скорость опускания и подъема груза в воде составляет 1,5 – 2,5 м/с.

Таким образом общее время цикла рассчитаем по выражению (2.29):

$$t_{\text{общ}} = \frac{t_{\text{зап.б}} + t_{\text{сп}} + t_{\text{под}} + t_{\text{разгр}}}{3600}, \quad (2.29)$$

где $t_{\text{сп}}$ – время спуска, с,

$t_{\text{под}}$ – время подъема, с,

$t_{\text{разгр}}$ – время разгрузки бункера, с, ($t_{\text{разгр}} = 300$ с).

В упрощенном представлении время спуска и подъема рассчитываются по формуле (2.30):

$$t_{\text{сп}} = t_{\text{под}} = \frac{H}{\vartheta_{\text{сп}}}, \tag{2.30}$$

где H – высота подъема, м,

$\vartheta_{\text{сп}}$ – скорость спуска/подъема, м/с.

Соотнося полученное общее время цикла и годовой фонд рабочего времени можно определить требуемое количество циклов в году по формуле (2.31):

$$N_{\text{ц.год}} = \frac{T_{\text{год}}}{t_{\text{общ}}} \cdot k_{\text{нер}}, \tag{2.31}$$

где $k_{\text{нер}}$ – коэффициент неравномерности подъема, закладывается исходя из неравномерности рудного потока, так как могут быть непредвиденные эксплуатационные простои бункера и т. д.

Зная требуемое количество циклов подъема и заданную годовую производительность определим необходимое количество ЖМК в одном подъеме для достижения заданной производительности по формуле (2.32):

$$Q_{\text{ЖМК}} = \frac{Q_{\text{год}} \cdot 10^6}{N_{\text{ц.год}}}, \tag{2.32}$$

По требуемому количеству поднимаемых ЖМК и ранее выбранной грузоподъемности бункера по формуле (2.33) определим минимальное количество бункеров:

$$n_{\text{б}} = \frac{Q_{\text{ЖМК}}}{P_{\text{б}}}, \tag{2.33}$$

Скоростная характеристика подъема бункера будет во многом зависеть от обтекания поднимаемого груза. В качестве предлагаемого способа увеличения скорости могут выступать обтекаемые каркасы или капсулы.

С целью определения рациональных параметров добычного комплекса, основываясь на исходных данных – требуемой годовой производительности, был

произведен ориентировочный расчет основных минимальных значений для достижения требуемой производительности, сведенных в таблице 2.6.

Расчеты показали, что годовую производительность 0,3 млн. т/год возможно обеспечить набором оборудования, состоящего из: судно обеспечения, 250 сборщиков «особей», 2 поочередно опускаемых и поднимаемых бункера г/п до 50 т и вспомогательных устройств, необходимых для обеспечения и бесперебойной работы такого количества сборщиков.

Дальнейшее увеличение годовой производительности возможно путем увеличения вышеперечисленного набора оборудования. То есть для достижения производительности 2-3 млн. т/год необходимо будет до 10 судов обеспечения, каждое из которых работает с двумя бункерами и 250 сборщиками.

Основное внимание в расчете производительности следует уделить времени цикла и полезной массе груза. В случае с комплексом, не использующим ПС для смены участка уравнение (1.1) с подстановкой уравнения (2.1) приобретает вид (2.34):

$$Q_{\text{год}}^{\text{станд.}} = \frac{Gn}{(n_{\text{зап}}(t_{\text{сп}} + t_{\text{п}} + t_{\text{р}}) + nt_{\text{сб}} + t_{\text{см1}})k_{\text{нав}}} t_{\frac{\text{ч}}{\text{год}}}, \quad (2.34)$$

Для того чтобы получить количество бункеров, поднимаемых с одного участка, необходимо воспользоваться формулой (2.35):

$$n = \frac{qS_{\text{уч}}}{G}, \quad (2.35)$$

где $S_{\text{уч}}$ – площадь участка добычи (700х700м), м^2.

В качестве примера выполнен расчет количества бункеров для участка с плотностью распределения конкреций 12 кг/м^2 и грузоподъемностью бункера – 100 тонн:

$$n = \frac{12 \cdot 700 \cdot 700}{100000} = 58{,}8$$

Как видно из полученного значения, дробная часть n представляет собой недозаполненный 59-й поднимаемый бункер с ЖМК при истощении участка добычи. Количество заполненных бункеров $n_{\text{зап}}$ для этого расчета будет равно 59.

Таким образом, в случае с формулой (2.34) количество спусков, подъемов и разгрузочных операций составляет 59 раз, время сбора мини-роботами 58,8$t_{сб}$, так как сборщики в конце итерации не заполнят бункер до конца, следовательно, потратят меньше времени. И в знаменателе формулы (2.34) количество собранного материала будет равняться Gn, то есть масса полных бункеров в количестве 58 штук и один, заполненный на 0,8 от общей грузоподъемности.

Для комплекса со сменой участка при помощи ПС уравнение (1.1) с подстановкой уравнения (2.4) приобретает вид (2.36):

$$Q_{\text{год}}^{\text{ПС}} = \frac{Gn_{\text{зап}}}{\left(n_{\text{зап}} \cdot \left(t_{\text{сп.}} + t_{\text{сб.}} + t_{\text{п.}} + t_{\text{р.}}\right) + t_{\text{см2.}}\right) \cdot k_{\text{нав}}} t_{\frac{\text{ч}}{\text{год}}}, \qquad (2.36)$$

По значениям, представленным в Приложении В, построены зависимости годовой производительности комплекса добычи ЖМК от скорости подъема/спуска тросовой установкой и времени цикла этих операций (рисунок 2.14). Также получены зависимости годовой производительности комплекса от плотности распределения конкреций для разных способов смены участка (рисунок 2.15).

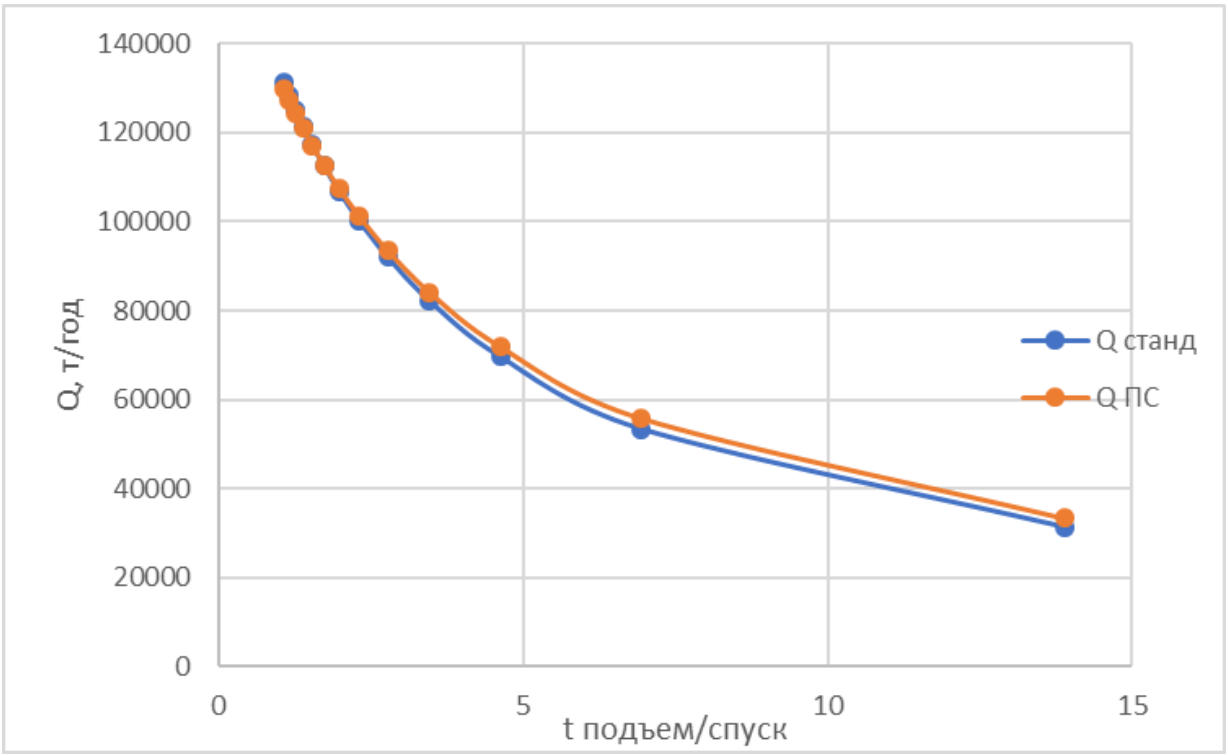


Рисунок 2.14 – Зависимости годовой производительности комплекса от времени подъема/спуска для разных способов смены участка (составлено автором)

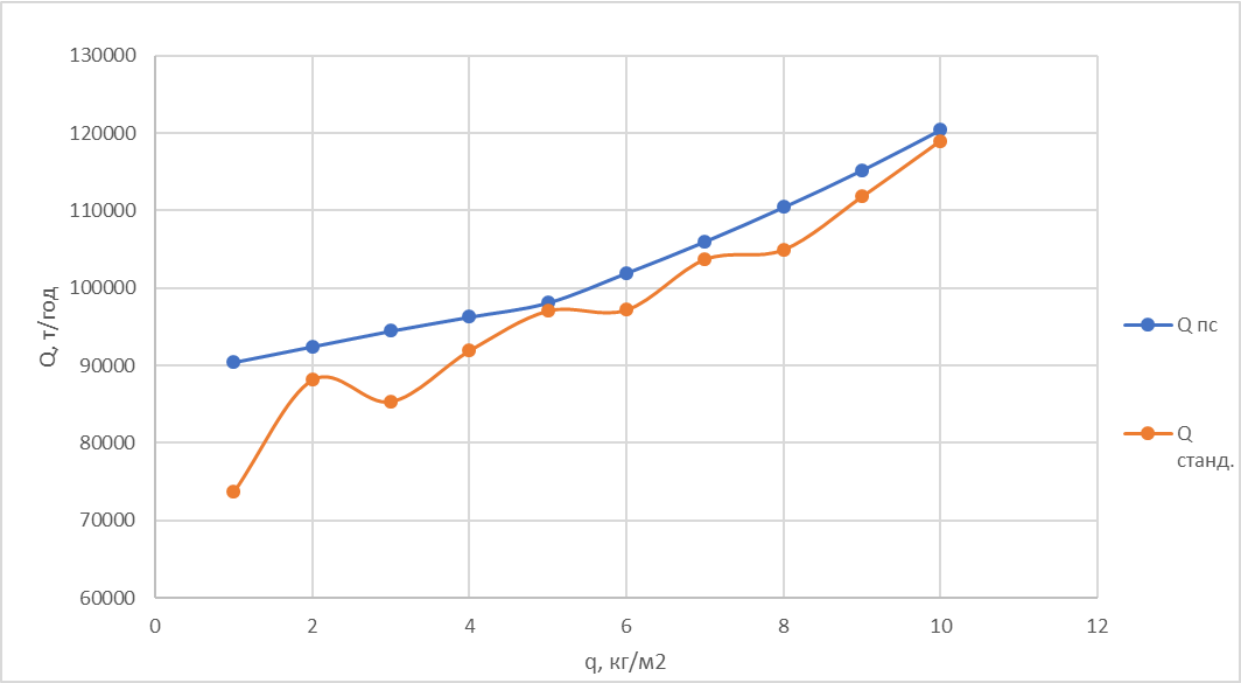


Рисунок 2.15 – Зависимости годовой производительности комплекса от плотности распределения конкреций для разных способов смены участка (составлено автором)

По предварительному расчету производительности добычного комплекса установленные зависимости показывают, что использование способа смены участка при помощи передвижного спредера целесообразно, однако требует уточнения параметров скорости перемещения бункера с учетом коэффициента гидродинамического сопротивления для гидродинамических форм.

2.7 Выводы по главе 2

1. Проведен анализ способов перемещения подводных аппаратов по дну, по результатам которого для опытного и промышленного образца добычного комплекса рекомендованы установки шагающего типа с рукоятями и гидроприводами.

2. Определена компоновочная схема добычного комплекса и проанализированы варианты комплектации промышленного и опытного образца, анализ параметров устройств для транспортировки ЖМК показал, что для использования рассматриваемого способа добычи необходимо наличие передвижного спредера, трех лебедок с кабель-тросами, автономной станции с мини-роботами сборщиками «РОЙ» и бункером-накопителем.

3. Расчет параметров гидравлической системы и определение алгоритма шагания позволил установить требуемую минимальную скорость передвижения спредера – 0,4 м/с и минимальную скорость подъема лебедкой – 2 м/с. Проанализировано влияние гидродинамической силы на передвигающийся спредер, для уточнения коэффициента сопротивления необходимо провести экспериментальное исследование.

4. Расчет подруливающих устройств рамы с ходовыми винтами для подъема бункера с собранными ЖМК на судно показал, что для расчета необходимо учитывать отклонение поднимаемого или опускаемого бункера от центра оси.

5. Проведен анализ производительности добычного комплекса, использующего передвижной спредер, автономную станцию с мини-роботами сборщиками «РОЙ» и бункер-накопитель. Подробно представлена методика определения времени цикла добычи ЖМК и дальнейший расчет производительности по массе добываемых ТПИ.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ АГРЕГАТОВ ШАГАЮЩЕГО ТИПА

3.1 Задачи экспериментального исследования

Экспериментальное исследование гидродинамического сопротивления направлено на изучение характеристик сопротивления движению жидкости или тел в жидкости. Оно основывается на выполнении серии измерений, позволяющих определить зависимости между параметрами потока, свойствами жидкости, геометрией тел и сопротивлением, возникающим при их взаимодействии. Перед проведением определяются цели исследования, такие как определение коэффициента гидродинамического сопротивления для конкретной геометрии, исследование влияния турбулентности или анализ условий обтекания тел.

Задачи исследования:

- Определить влияние гидродинамического сопротивления на перемещение модели рычага-манипулятора ПС с разной скоростью и сечением;

- Обосновать выбор предпочтительного сечения рычага-манипулятора;

- Проанализировать выбор предпочтительного сечения и его влияние на скорость ПС и производительность в целом.

3.2 Разработка методик, число серий, число опытов

Суть экспериментального исследования заключается в определении силы гидродинамического сопротивления при перемещении модели рычага-манипулятора в лабораторном стенде с жидкостью. Исследование проводилось на трех моделях рычагов-манипуляторов с сечениями разного исполнения: без отверстий, с отверстиями – 3 мм, с отверстиями – 7 мм. Для расчета дисперсий и критериев воспроизводимости и получения адекватных результатов, необходимо провести 5 замеров на каждую скорость перемещения одной модели. Таким образом, понадобится 125 замеров, не учитывая дополнительных.

Модели рычагов-манипуляторов представляют собой трубки эллипсоидного сечения из алюминия. Линейные размеры испытуемых объектов представлены на рисунке.

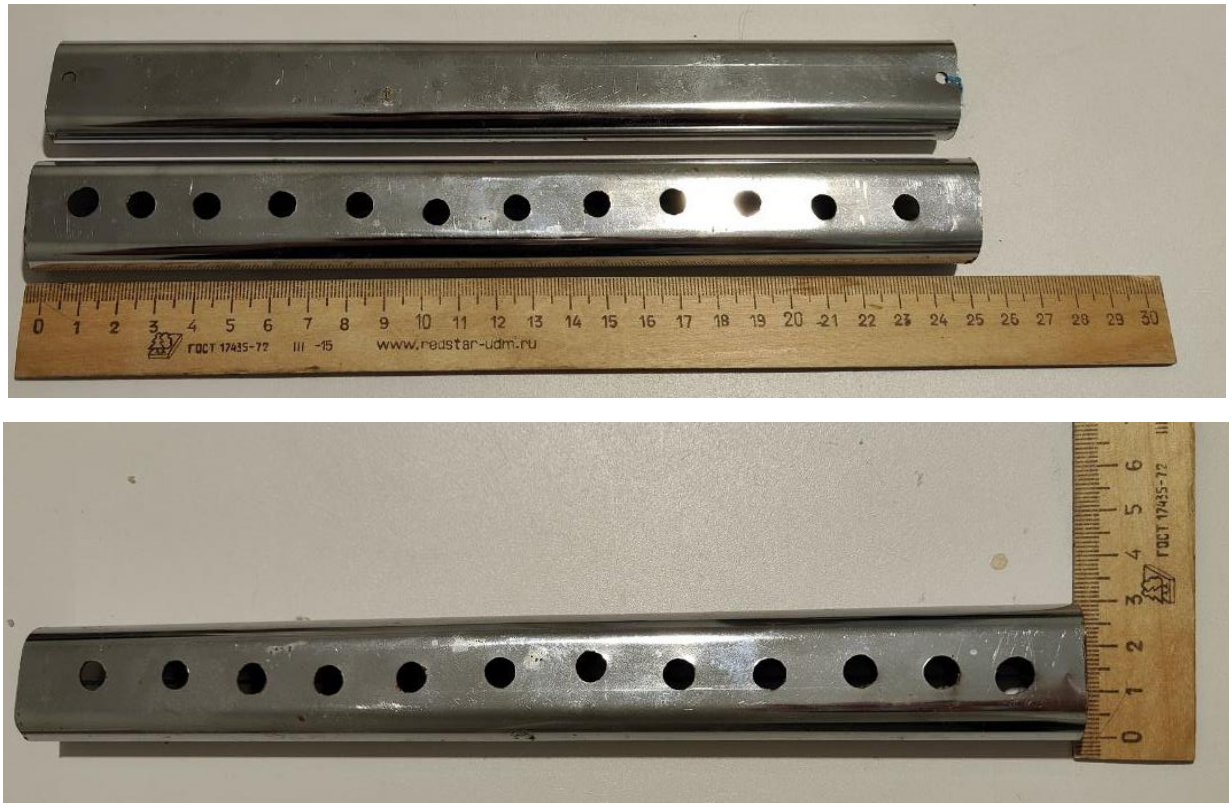


Рисунок 3.1 – Линейные размеры испытуемых объектов (фото автора)

Обработка результатов измерений ведется в программе Microsoft Excel, все вычисления и замеры представлены в Приложении В.

3.3 Описание экспериментальной установки

На производительность любого шагающего агрегата, работающего в составе комплекса сбора ЖМК или КМК влияют два основных фактора: скорость передвижения и производительность исполнительного органа [26-27]. Скорость передвижения агрегата шагающего типа складывается из совокупности всех выдвижений и подтягиваний его рычагов, за счет действующих на рычаги гидроцилиндров [28-29]. Взаимосвязь между силой на штоке гидроцилиндра $F_{\text{рычаг}}$ и скорости выдвижения этого рычага $v_{\text{рычаг}}$ лежит в основе расчета перемещения. Сила на штоке позволяет определить объем поршневой полости гидроцилиндра, необходимый

для подбора насоса, расходная характеристика которого определяет скорость перемещения штока, соответственно рычага агрегата.

Определяемая сила на штоке $F_{\text{рычаг}}$ должна учитывать как максимальный вес всей конструкции, так и сопротивление формы элементов агрегата $F_{\text{гидр}}$ при его перемещении под водой. По известной формуле $R_{\text{сопр}} = 0{,}5c_x S\rho v^2$ определяется сила гидродинамического сопротивления, где S – контактное сечение, ρ – плотность среды, v – скорость объекта, а c_x – коэффициент сопротивления, принимаемый для простейших форм по справочной литературе. Для определения силы гидродинамического сопротивления на кафедре ТТПиП СПГУ были проведены экспериментальные исследования объектов сложной формы (рисунок 3.2).

Рисунок 3.2 – Экспериментальные исследования гидродинамического сопротивления моделей рычагов-манипуляторов агрегата (фото автора)

Стенд включает в себя стеклянный резервуар, тензодатчик для передачи информации о сопротивлении через специальный модуль на ноутбук, три образца разного контактного сечения: без отверстий, с отверстиями 3 мм, с отверстиями 7 мм.

3.4 Результаты экспериментального исследования

Результаты, полученные в ходе исследований позволили построить осцилограмму, где отчетливо видна амплитуда, при которой исследуемое тело испытывало наибольшие нагрузки при перемещении. По данным из осциллограммы построены линии тренда экспериментальных данных сил сопротивлений F от скорости перемещения образцов *v* (рисунок 3.3).

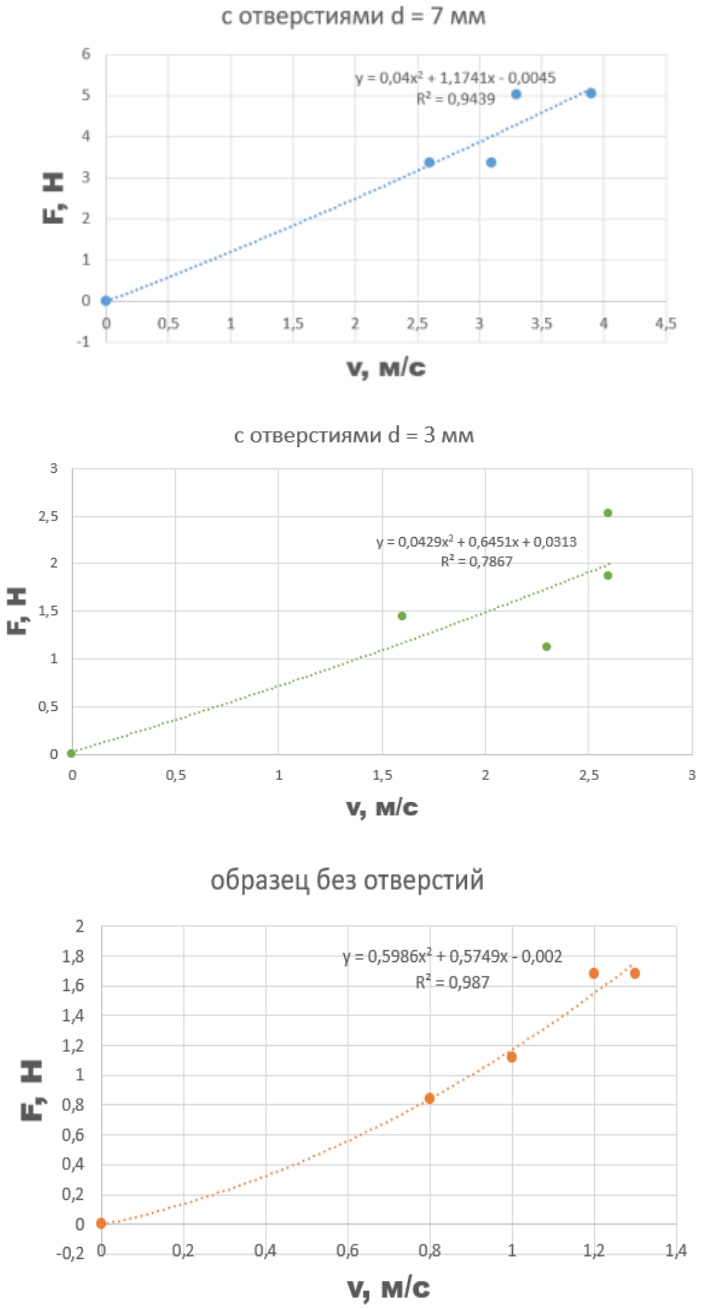
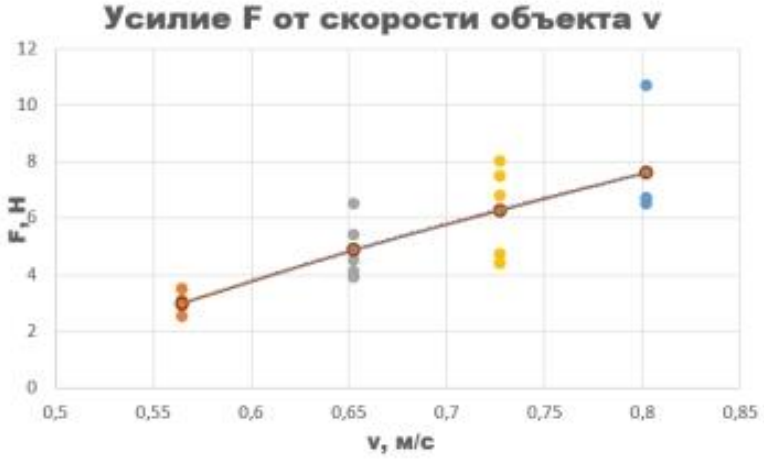


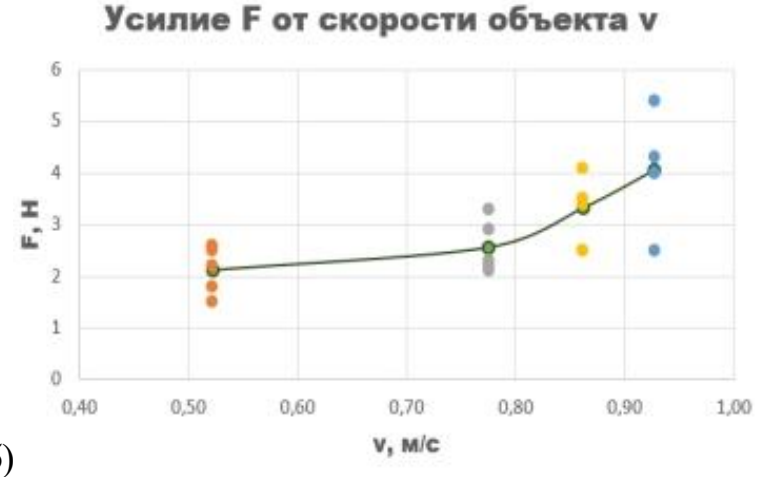
Рисунок 3.3 – Линии тренда сил гидродинамического сопротивления в зависимости от скорости движения для моделей с разной конфигурацией контактной поверхности (составлено автором)

Для сравнения коэффициентов сопротивления элементов ПС были проведены экспериментальные исследования двух моделей рычагов-манипуляторов эллипсоидного сечения без отверстий и с отверстиями 7 мм. Стенд включает в себя стеклянный резервуар и тензодатчик для передачи информации о сопротивлении через специальный модуль на ноутбук. Замеры производились через поступательное перемещение погруженного образца, связанного моделью каната с тензодатчиком.

При экспериментальном исследовании двух образцов эллипсоидного сечения (без отверстий, с отверстиями 7 мм) по выражению $c_x = 2F_{гидр}/S\rho v^2$ было рассчитано и выявлено, что у модели «лап», где присутствуют отверстия, за счет обтекаемости формы максимальный коэффициент гидродинамического сопротивления равен 0,45, в сравнении с образцом без отверстий с коэффициентом 0,62 (рисунок 3.4, 3.5).



а)

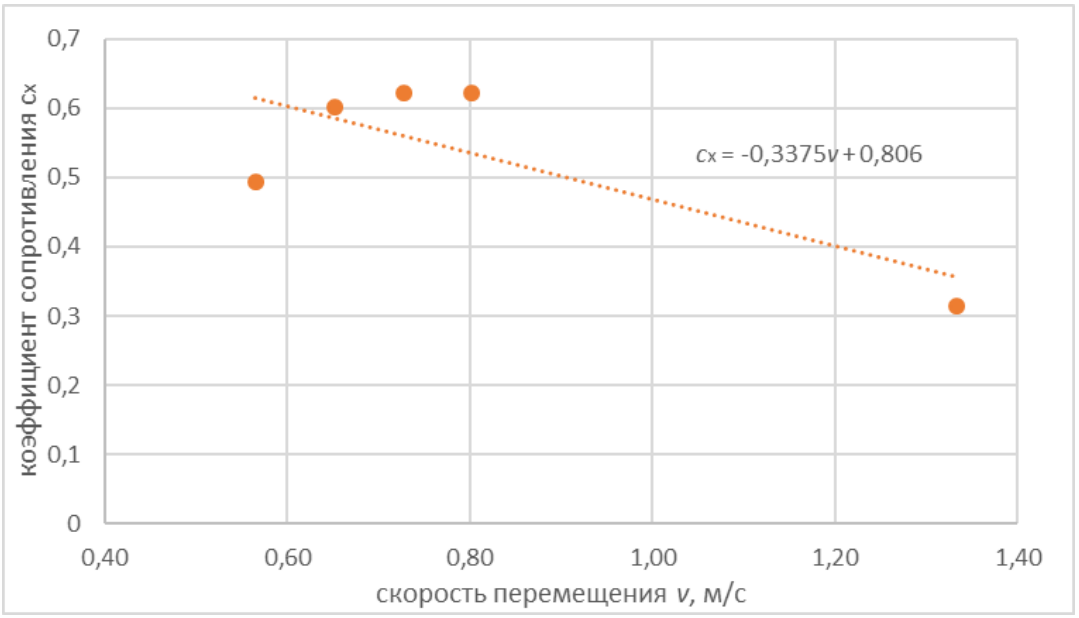


б)

Рисунок 3.4 – Экспериментальное исследование образцов а) без отверстий, б) с отверстиями 7 мм (составлено автором)

По полученным значениям c_x построены зависимости от скорости движения лапы.

а)



б)

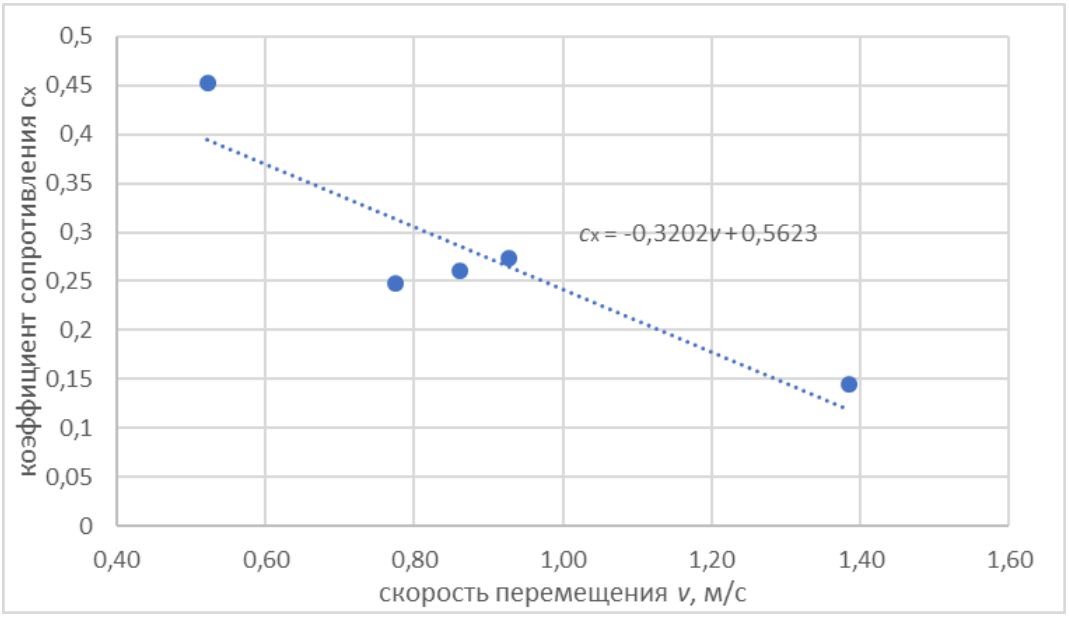


Рисунок 3.5 – Зависимость коэффициента c_x от скорости (а – модель рычага ПС без отверстий, б – модель рычага ПС с отверстиями 7 мм) (составлено автором)

Экспериментальное исследование коэффициента гидродинамического сопротивления подтвердило правильность его выбора при первоначальном расчете сил тяги, а соответственно и цикле шагания ПА. В соответствии с методикой обработки экспериментальных данных выполнен анализ однородности дисперсии и представлен в таблице 3.1 и 3.2. Расчеты дисперсии производились по методикам [60, 68] в Excel и представлены в приложении В.

Таблица 3.1 – Расчет однородности дисперсии для измерений модели рычага-манипулятора без отверстий (составлено автором)

Сумма всех дисперсий	$\sum S_{\upsilon}^2$	8,18
Максимальная дисперсия в серии	$S_{\upsilon \max}^2$	4,21
Расчетное значение критерия Кохрена	G	0,51
Уровень значимости	q, %	5
Число степеней свободы	V1в	5 -1 = 4
Число степеней свободы	V2в	4
Табличное значение критерия Кохрена	Gкр	0,6287
Проверка однородности дисперсии	G – Gкр	0,0035
Вывод		однородны

Таблица 3.2 – Расчет однородности дисперсии для измерений модели рычага-манипулятора с отверстиями 7 мм (составлено автором)

Сумма всех дисперсий	$\sum S_{\upsilon}^2$	2,395
Максимальная дисперсия в серии	$S_{\upsilon \max}^2$	1,43
Расчетное значение критерия Кохрена	G	0,6
Уровень значимости	q, %	5
Число степеней свободы	V1в	5 -1 = 4
Число степеней свободы	V2в	4
Табличное значение критерия Кохрена	Gкр	0,6287
Проверка однородности дисперсии	G – Gкр	0,0935
Вывод		однородны

Проведенные расчеты подтверждают однородность дисперсии и в дальнейшем можно использовать среднее значение $S_{\upsilon}^2 = 0{,}2217$.

После проведения серии экспериментов по измерению гидродинамического сопротивления модели трубы эллипсоидного сечения в водной среде была получена зависимость силы сопротивления от скорости поступательного движения [65]. Измерения проводились в стеклянном резервуаре длиной 1 метр с

использованием тензодатчика, регистрирующего сопротивление при перемещении модели с различными скоростями. Экспериментальный объект представлял собой трубку длиной 0,25 м и площадью боковой поверхности 0,0335 м².

Обработка экспериментальных данных рисунка 3.4 показала возрастание силы сопротивления при увеличении скорости. Такая зависимость характерна для гидродинамики тел обтекаемой формы, особенно в условиях турбулентного обтекания, когда сопротивление пропорционально квадрату скорости. Однако в нижнем диапазоне скоростей (менее 0,8 м/с) наблюдаются отклонения от квадратичного закона, что обусловлено, вероятно, влиянием переходного режима течения, начальных инерционных эффектов, а также возможным трением в крепёжных элементах. Это нашло отражение в полиномиальной аппроксимации второго порядка по всем экспериментальным точкам (3.1):

$$F(v) = 19{,}724v^2 - 23{,}813v + 9{,}1759, \quad (3.1)$$

где F — сила сопротивления, Н,

v — скорость движения, м/с.

Уравнение адекватно описывает общий тренд, однако для последующего масштабирования предпочтительно использовать зависимость, соответствующую чистому квадратичному характеру сопротивления.

В связи с этим из анализа были исключены начальные значения, и аппроксимация проводилась только по диапазону скоростей $v \geq 0{,}86$ м/с, где сопротивление демонстрировало устойчивый рост. Получена следующая аппроксимирующая зависимость:

$$F(v) = 5{,}84v^2$$

На основании этой зависимости была проведена оценка коэффициента гидродинамического сопротивления c_x по формуле (1.4):

$$c_x = \frac{2F_{\text{сопр.}}}{\rho S v^2}$$

Подстановка коэффициента 5,84 в выражение выше даёт приближённое значение $c_x \approx 0{,}35$. При этом максимальное значение коэффициента, полученное из экспериментальных данных, составило 0,45, что объясняется переходными

режимами и локальными возмущениями потока. С учётом этого, а также для обеспечения запаса прочности в инженерных расчётах, в дальнейших оценках принято использовать наибольшее экспериментально полученное значение: c_x = 0,45.

Используя это значение, модельная сила сопротивления может быть выражена как (3.2):

$$F_м(v) = 0{,}5 c_x \rho S v_2 = 0{,}5 \cdot 0{,}45 \cdot 1000 \cdot 0{,}0335 \cdot v^2 = 7{,}5375 v^2, \quad (3.2)$$

Для масштабирования результатов на условия реального объекта применяются законы подобия. Основным масштабным параметром является масштаб длины (3.3):

$$\lambda_L = \frac{L_{нат}}{L_{мод}} = \frac{12}{0{,}25} = 48, \quad (3.3)$$

где λ_L – масштабный коэффициент длины,

$L_{нат}$ – длина натурного объекта (12 метров), м,

$L_{мод}$ – длина модели, м.

В гидродинамике силы масштабируются по формуле (3.4):

$$\lambda_F = \lambda_L^2, \quad (3.4)$$

где λ_F – масштабный коэффициент силы.

Таким образом, масштабный коэффициент для силы:

$$\lambda_F = 48^2 = 2304$$

Скорости моделируемого и натурного объектов находятся в подобии по числу Рейнольдса, и в данном случае предполагается их равенство: λ_ν = 1, что позволяет перенести полученную зависимость для силы сопротивления на натурные условия следующим образом (3.5):

$$F_n(v) = F_м(v) \cdot \lambda_F = 17366 v^2, \quad (3.5)$$

где $F_п$ — сила сопротивления в ньютонах в реальном масштабе.

Полученное выражение позволяет рассчитать сопротивление движению натурного объекта с учётом масштабной трансформации, основываясь на экспериментальных данных, полученных в модельных условиях. Таким образом, эксперимент позволил не только получить качественную и количественную

характеристику сопротивления модели, но и провести корректное масштабирование результатов для инженерных расчётов, что делает исследование полноценной частью проектной основы для последующих технических решений.

Для корректного масштабирования результатов физического эксперимента необходимо обеспечить соблюдение основных критериев подобия, в первую очередь динамического подобия, основанного на числе Рейнольдса. Число Рейнольдса (Re), определяемое как $\mathrm{Re} = \frac{vL}{\nu}$, где v — скорость, L — характерный размер, а ν — кинематическая вязкость жидкости, является определяющим параметром в описании режима течения: ламинарного, переходного или турбулентного. Для обеспечения точного соответствия условий модели и натурного объекта требуется, чтобы выполнялось равенство $\mathrm{Re}_{\text{мод}} = \mathrm{Re}_{\text{нат}}$, что означает (3.6):

$$\frac{v_{\text{мод}}}{v_{\text{нат}}} = \frac{L_{\text{нат}}}{L_{\text{мод}}} = \lambda_L, \tag{3.6}$$

Однако в настоящем эксперименте реальная скорость объекта составляет 0,2 м/с, в то время как скорость модели доходила до 1,39 м/с. Следовательно, строгое подобие по числу Рейнольдса не соблюдено. Тем не менее, все эксперименты проводились в условиях, соответствующих турбулентному режиму течения ($\mathrm{Re} \gg 10^4$), при котором влияние числа Рейнольдса на сопротивление становится менее выраженным. В связи с этим, в последующих оценках было принято приближение $\lambda_v = 1$ (равенство скоростей натурного и модельного объектов), что позволило провести масштабирование силы сопротивления с использованием масштабного коэффициента по длине: $\lambda_L = 48$. Коэффициент может быть использован при проектировании рычагов-манипуляторов ПС в рамках создания опытного образца добычного комплекса.

3.5 Анализ напряжений в узлах ПС в критический момент

Конструктивные особенности узлов спредера могут быть скорректированы и учтены при проектировании. Как показало экспериментальное исследование (в котором принимал участие Бородкин Э.О) [42], использование в конструкции

обтекаемых форм, эллипсоидного или каплевидного миделева сечения с заложенными в конструкцию рычага-манипулятора отверстиями будет оказывать положительную динамику при сокращении гидродинамического влияния на скорость передвижения спредера или иного шагающего подводного агрегата. Однако, проектирование должно учитывать в особенной степени прочностные особенности элементов и узлов агрегата, места наиболее подверженные нагрузкам. С этой целью ниже было проведено исследование усилий, воздействующих на узлы шагающего агрегата-сборщика, проявляющиеся непосредственно в динамике, поскольку и ПС и сборщик (рисунок 2.2) имеют схожую конструкцию рычагов-манипуляторов.

Графически определим усилия, действующие на гидроцилиндр стрелы (рисунок 3.6). Для жесткости конструкции предполагается разместить два гидроцилиндра по бокам стрелы для избегания крутящего момента во время шагания. За счет распределения нагрузки и уменьшения усилий диаметр поршня уменьшится. Это позволит сэкономить пространство на поворотной цапфе для соседних гидроцилиндров.

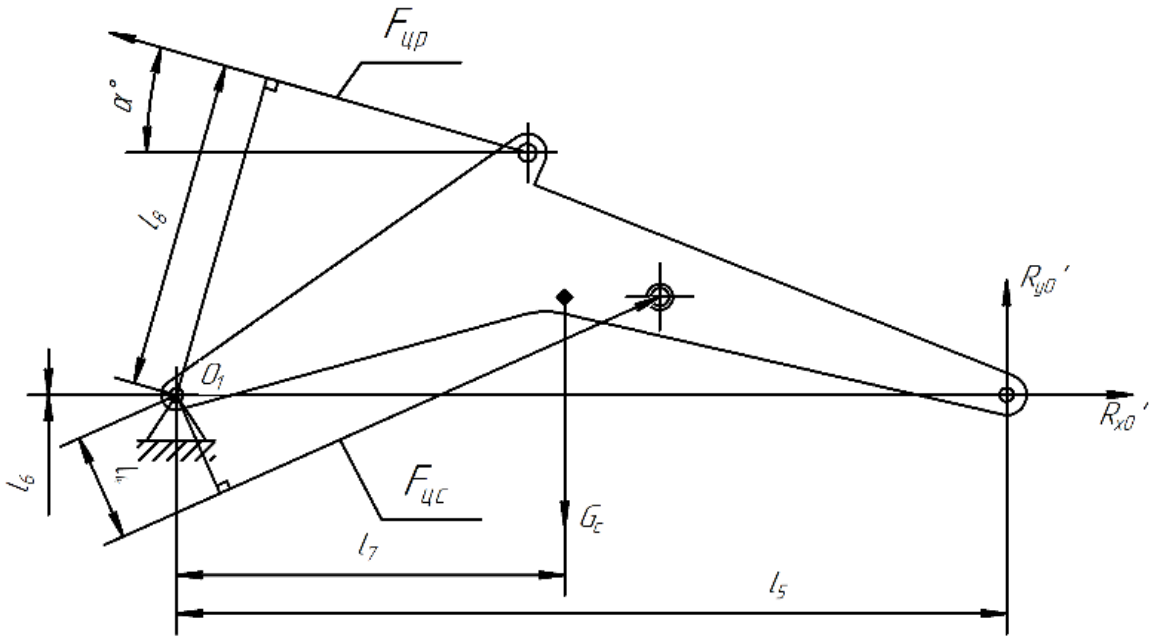


Рисунок 3.6 – Схема приложения сил к рукояти [42]

Данные гидроцилиндры служат для поддержания коллектора в горизонтальном положении во время шагания и, впоследующем, опускании его на

дно. Максимальная нагрузка будет во время начала шагания и отрыва коллектора ото дна. Причем гидроцилиндр рукояти и стрелы работают одновременно.

Составим уравнение моментов относительно точки «О» (3.7):

$$\sum M = 0\,, \tag{3.7}$$

Выразим $F_{\text{цс}}$ (усилие на штоке гидроцилиндра стрелы) из уравнения 3.8, представив его как выражение 3.9:

$$R_{yo}{}' \cdot l_5 + R_{xo}{}' \cdot l_6 - G_c \cdot l_7 + F_{\text{цр}} \cdot l_8 + z \cdot F_{\text{цс}} \cdot l_4 = 0, \tag{3.8}$$

$$F_{\text{цс}} = \left(\frac{-R_{yo}{}' \cdot l_5 - R_{xo}{}' \cdot l_6 + G_c \cdot l_7 - F_{\text{цр}} \cdot l_8}{z \cdot l_4}\right), \tag{3.9}$$

гдеG_c, – вес стрелы, Н,

l_4, l_5, l_6, l_7, l_8 – плечи действия соответствующих сил, приложенных к центру тяжести, м,

$F_{\text{цс}}$ – усилие на штоке гидроцилиндра стрелы, Н,

z – количество гидроцилиндров.

$$F_{\text{цс}} = \left(\frac{-11{,}3 \cdot 10^4 \cdot 4{,}1 - 42{,}16 \cdot 10^4 \cdot 0 + 0{,}519 \cdot 10^4 \cdot 1{,}9 - 43{,}65 \cdot 10^4 \cdot 1{,}6}{2 \cdot 0{,}5}\right) = -115\text{кН}$$

Полученное отрицательное значение, характеризует обратную силу действия на поршень гидроцилиндра. Необходимо преодолеть это усилие, чтобы поднимать установку.

Согласно предварительному расчету по формуле (3.10) диаметр поршня:

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{11{,}5 \cdot 10^4}{3{,}14 \cdot 20}} = 86\ (\text{мм}), \tag{3.10}$$

По ГОСТ 6540-68 (СТ СЭВ 3936-82) приведем диаметр поршня к стандартному по основному ряду – 100 мм, тогда сила, развиваемая гидроцилиндром рукояти (3.11):

$$F = P \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 20 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 100^2}{4} = 157\ (к\text{Н}), \tag{3.11}$$

Данное звено является частью несущей конструкции всего рабочего оборудования и служит опорой и движителем. Все нагрузки, передающиеся во время шагания, будут распределяться на проушины стрелы и два гидроцилиндра, закрепленных на поворотной цапфе. Поэтому целесообразно применить больший диаметр штока и соответственно поршня.

По расчетам в программе KOMPAS v.18 APM FEM (рисунок 3.7) гидроцилиндры со штоками диаметром 130 мм способны воспринимать нагрузки на 30% превышающие допустимые.

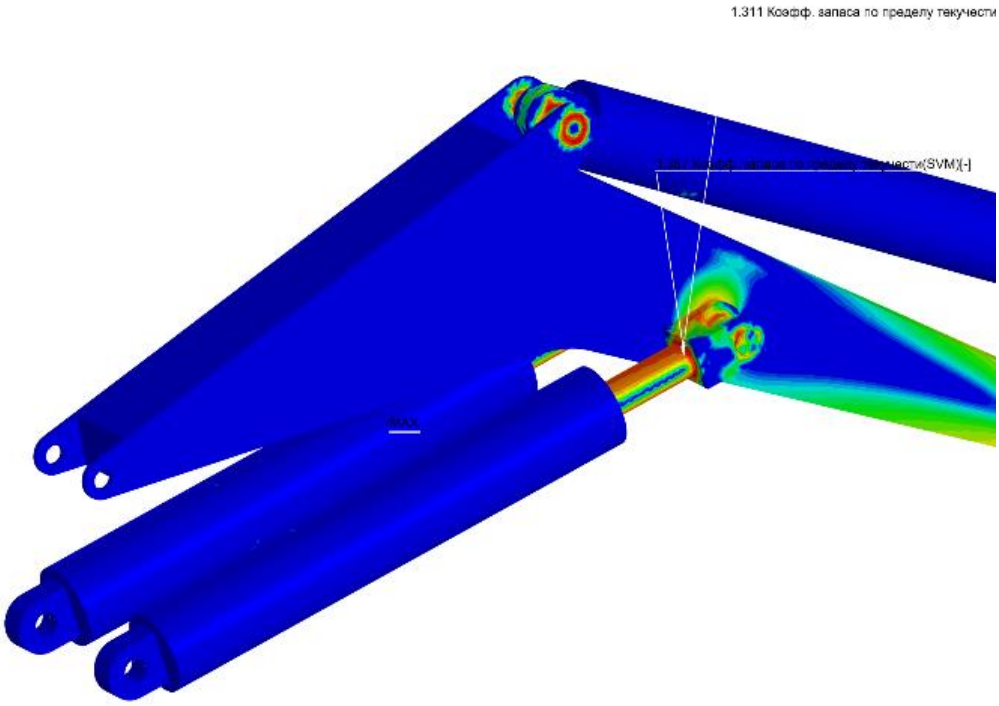


Рисунок 3.7 – Эпюры напряжении в стреле и рукояти [42]

Был выполнен анализ напряжений в конструкции ПС (рисунок 3.8): представлены области (эпюры) максимальной нагрузки на элементы ПС при его статическом положении. На основе анализа, выполненного в программе KOMPAS v.18 APM FEM, в конструкцию внесены изменения.

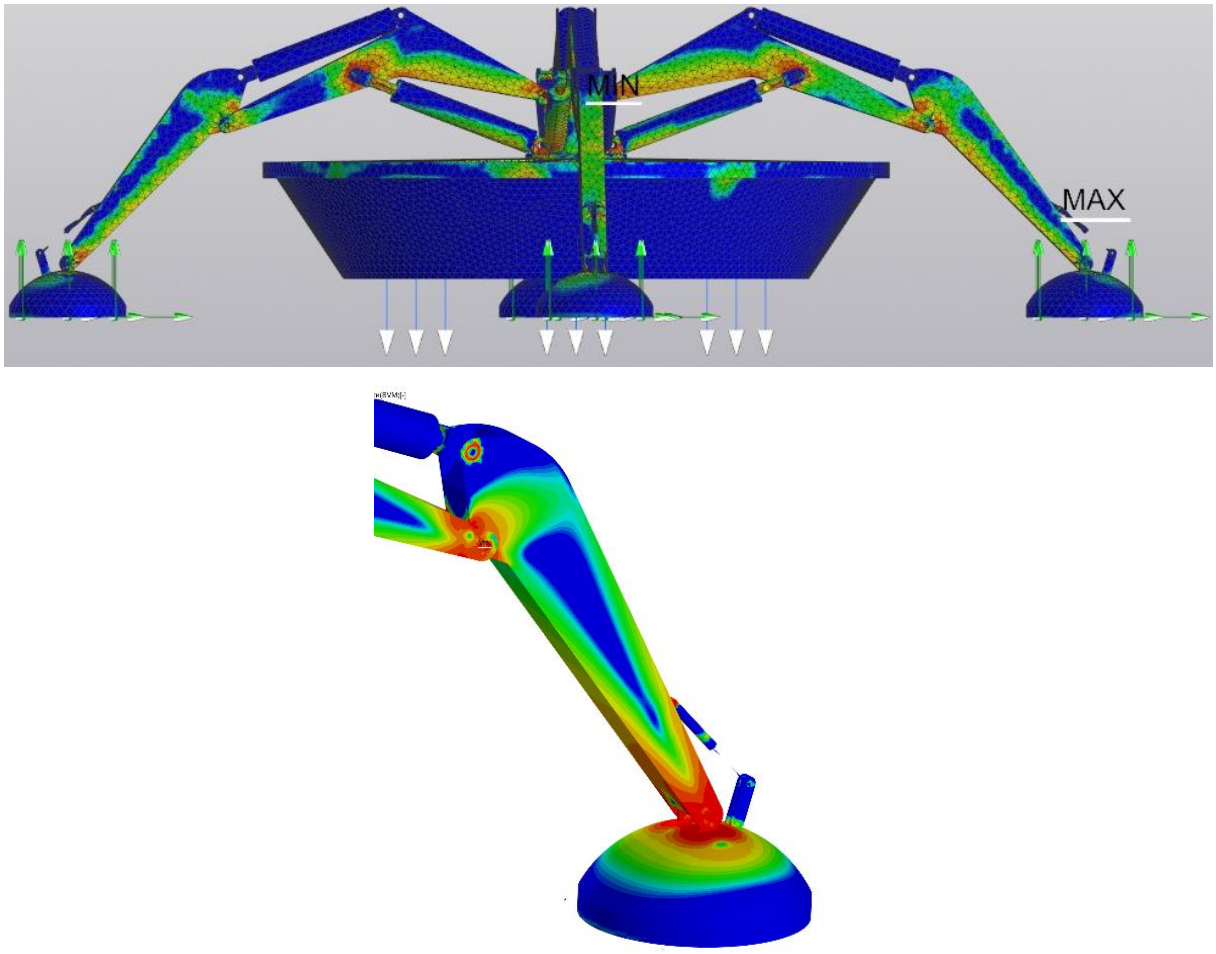


Рисунок 3.8 – Эпюры напряжений ПС в критический момент шагания [42]

Как видно из областей, отмеченных красным цветом, наиболее уязвимые места в узлах соединения гидроцилиндров с балками ПА, что будет учтено при выполнении рабочих чертежей.

3.6 Выводы по главе 3

1. Поставлены задачи экспериментального исследования, в частности анализ обтекаемости моделей рычагов перемещения спредера и других возможных шагающих установок.

2. Разработаны методики экспериментального исследования, установлено необходимое число серий и опытов для получения входных данных для построения зависимостей силы гидродинамического сопротивления от скорости передвижения модели шагающей установки

3. Дано подробное описание экспериментальной установки, стенд представляет собой стеклянный резервуар, наполняемый водой; тензодатчик, программа COM-PORT; исследуемые модели эллипсоидного сечения с различной конфигурацией контактной поверхности, модель каната.

4. Результаты экспериментального исследования показали, что выбранный таблично коэффициент гидродинамического сопротивления завышен и при использовании значений, полученных эмпирически, сила гидродинамического сопротивления, учитываемая в расчете усилий на штоке гидроцилиндра, сокращается в 2 раза.

5. Проанализированы напряжения в узлах шагающего аппарата в критический момент при динамике, в программе KOMPAS v.18 APM FEM проведен прочностной анализ и представлены области для возможного упрочнения конструкции опытного образца шагающего аппарата.

ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР СХЕМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО СБОРА ТПИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЗАЛЕГАНИЯ

4.1 Конструкция добычного комплекса для рассредоточенных по дну ТПИ

Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых содержащий базовое судно, связанное с добычным агрегатом, захватное устройство, транспортирующее устройство, отличающийся тем, что базовое судно оснащено тремя барабанными лебедками, установленными в центре, на носу и корме базового судна, грузонесущие кабель-тросы которых оснащены оптико-волоконными каналами связи, при этом свободный конец кабель-троса барабанной лебедки, установленной в центре базового судна, соединен с захватным устройством, выполненным в виде рамы с установленными на ней двумя винтовыми движителями, с закрепленным внутри рамы ходовым винтом с левой и правой резьбой, снабженным приводом, связанным с двумя рычагами с возможностью возвратно-поступательного движения относительно оси ходового винта, при этом на концах рычагов шарнирно закреплены фиксаторы Г образной формы с возможностью взаимодействия с транспортирующим устройством в виде грузового бункера– накопителя полезного ископаемого, корпус которого в верхней части снабжен буртиком, размещенным по всему периметру, а в нижней устройствами горизонтирования- домкратами, при этом добычной агрегат выполнен в виде шагающих роботов-отбойщиков, каждый из которых снабжен ударником и не менее чем четырьмя лапами, в виде шарнирно-рычажных механизмов с гидроцилиндрами, с шарнирно закрепленными на свободных концах грейферами, и автономных роботов-сборщиков, каждый из которых снабжен системой регулирования плавучести, и не менее чем четырьмя водометными движителями, шарнирно установленными в направляющих с возможностью поворота не менее чем на 130 градусов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях относительно корпусов автономных роботов-сборщиков, каждый из которых выполнен с отсеком-коллектором сбора полезного ископаемого с

открывающимися крышками, с размещенной в верхней части корпуса аккумуляторной батареей, гидроакустическим приемопередающим устройством, и шарнирно соединенным с передней частью корпуса механическим манипулятором с захватом-схватом на свободном конце, а так же средствами мониторинга, включающими цифровую видео камеру и прожектор, при этом автономные роботы-сборщики телекоммуникационно связаны с боксом–ангаром, разделенным на секции-ячейки, снабженным блоком питания с зарядной станцией, гидроакустическим приемопередающим модулем и соединенным кабель-тросом с барабанной лебедкой, установленной на носу базового судна, а шагающие роботы отбойщики соединены кабелем с распределительным устройством, размещенным на общей платформе, снабженной системой горизонтирования- домкратами, и включающим индивидуальные катушки и трансформаторные батареи, посредством кабель-троса связанные с барабанной лебедкой, установленной на корме базового судна.

Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых (рисунок 4.1, 4.2, фиг. 1, 2) включает базовое судно 1, на носу, корме и в центре которого размещены три лебедки 2, грузонесущие кабель-тросы 3 которых оснащены оптико-волоконными каналами связи. Свободный конец 4 грузонесущего кабель-троса 3 лебедки 2, размещенной в центре базового судна 1 соединен с захватным устройством 5 (фиг.1,3), на верхней части рамы 6 которого размещены два винтовых движителя 7 позиционирования положения указанного устройства. Внутри рамы 6 установлен ходовой винт 8 с приводом 9, левая часть 10 которого выполнена с левой резьбой, а правая часть 11- с правой резьбой. Рычаги 12 в верхней части жестко соединены с гайками 13, с левой и правой резьбой, входящими в зацепление с ходовым винтом 8, с возможностью возвратно поступательного движения относительно оси 14 ходового винта 8. На свободных концах рычагов 12 шарнирно закреплены фиксаторы 15, имеющие Г- образную форму. Транспортирующее устройство 16 (фиг. 1, 2) доставки полезного ископаемого 17, железомарганцевых конкреций или кобальтомарганцевых корок, на базовое судно 1 выполнено в виде грузового бункера- накопителя 18, корпус 19

которого по всему периметру в верхней части снабжен буртиком 20, жестко с ним связанным, а в нижней части- устройствами горизонтирования относительно поверхности морского дна 21 (фиг. 1), например, домкратами 22 (фиг. 8) Добычной агрегат комплекса для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых выполнен в виде дистанционно управляемых шагающих роботов отбойщиков 23 [20, 26] (фиг. 1, 4) и автономных роботов-сборщиков 24 (фиг. 1, 5). Корпус 19 шагающего робота-отбойщика 23 (фиг. 4) оборудован, размещенным в центре корпуса, ударником 25 и шарнирно соединен с не менее чем четырьмя лапами 26, выполненными в виде шарнирно-рычажных механизмов 27 с гидроцилиндрами 28.

На свободных концах лап 26 размещены грейферы 29, шарнирами 30 с ними связанные. Шагающие роботы-отбойщики 23 посредством кабеля 31 (фиг. 1, 2) соединены с распределительным устройством 32, включающим индивидуальные катушки 33 с намотанным кабелем 31, соединенные с трансформаторными батареями 34. Распределительное устройством 32 установлено на общей платформе 35, снабженной системой горизонтирования, например домкратами 22 и посредством кабель-троса 3 соединенное с барабанной лебедкой 2, установленной на корме базового судна 1. Автономный робот-сборщик24 (фиг.1,5) с системой регулирования плавучести, на чертеже не показана, имеет корпус 19 в нижней части снабженный отсеком-коллектором 36 сбора полезного ископаемого с открывающимися крышками 37. Автономный робот-сборщик 24 снабжен не менее чем четырьмя водометными движителями 38, установленными на боковых сторонах корпуса 19 (фиг.6,7) при помощи направляющих 39 шарнирами 30 связанными с корпусом 19 и водометным движителем 38 (фиг. 7) с возможностью поворота последнего не менее чем на 130 градусов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях относительно корпуса 19.

В передней части корпуса 19 автономного робота-сборщика 24 при помощи сферического шарнира 40 закреплен механический манипулятор 41 (фиг.5) свободный конец которого шарниром 30 соединен с захватом-схватом 42, а слева и справа от сферического шарнира 40-средства мониторинга, включающие

цифровую видеокамеру 43 и прожектор 44. В верхней части корпуса 19 установлены аккумуляторная батарея 45 и гидроакустическое приемопередающее устройство 46

Автономные роботы-сборщики 24 дистанционно, средствами телекоммуникации, связаны с боксом-ангаром 47 (фиг.1), разделенным на секции-ячейки 48 и снабженным блоком питания 49 с зарядной станцией 50 подзарядки автономных роботов-сборщиков 24 и гидроакустическим приемопередающим модулем 51. Бокс-ангар 47 кабелем 3 соединен с барабанной лебедкой 2, установленной на носу базового судна 1 (фиг. 1).

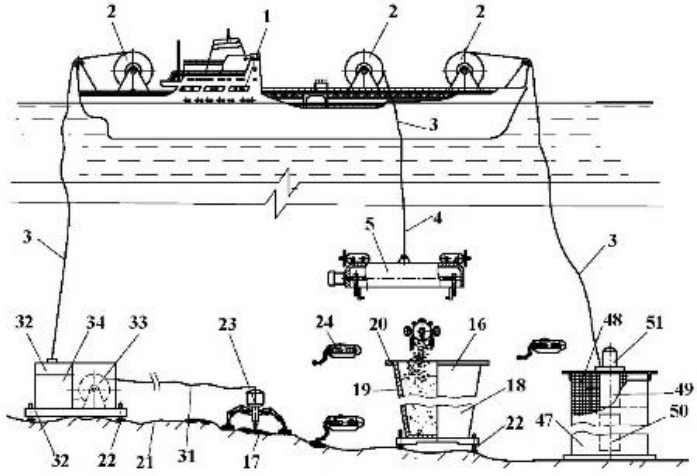
Предлагаемый комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых работает следующим образом. Базовое судно 1, оснащенное с тремя лебедками 2 (фиг. 1), приплывает к предварительно подготовленному участку разработки рассредоточенных полезных ископаемых, например, кобальтомарганцевых корок, размеры и границы которого заранее ограничивают установкой специальных реперов акустических сигналов, на чертеже не показаны. Первоначально на поверхность морского дна 21 спускают грузовой бункер накопитель 18. Для этого захватное устройство 5, соединенное со свободным концом 4 грузонесущего кабель-троса 3, проходящего через лебедку 2, размещенную в центре базового судна 1 и спредер (на чертеже не показан),приводят в рабочее положение(фиг. 1, 8), а именно включают привод 9 ходового винта 10, установленного в раме 6 захватного устройства 5.Благодаря тому, что левая часть 10 и правая часть 11 ходового винта 8 выполнены соответственно с левой и правой резьбой и взаимодействуют с гайками 13 рычагов 12, начинается поступательное движение рычагов 12 вдоль оси 14 ходового винта 8 в противоположные стороны, что обеспечивает раскрытие захватного устройства 5, сопровождающееся увеличением расстояния между фиксаторами 15 рычагов 12 до расстояния, определяемого размерами перемещаемого в дальнейшем устройства. В таком положении захватное устройство 5 опускают на поверхность грузового бункера-накопителя 18 (фиг. 8), выполняющего функцию транспортирующего устройства 16 доставки полезного ископаемого 17, например,

кобальтомарганцевых корок, на базовое судно 1. При этом фиксаторы 15, имеющие Г-образную форму подводят под буртик 20 корпуса 19 грузового бункера-накопителя 18 (фиг. 8), реверсируют привод 9 ходового винта 8 и, таким образом, надежно зажимают грузовой бункер-накопитель 18 в захватном устройстве 5. При помощи лебедки 2, установленной в центре базового судна 1 начинают спуск грузового бункера-накопителя 18 на морское дно 21. В процессе спуска включают винтовые движители 7 захватного устройства 5, осуществляющие «правильное» позиционирование грузового бункера-накопителя 18 при опускании или подъеме. В процессе установки грузового бункера-накопителя 18 (фиг.1),при необходимости домкратами 22 горизонтируют его положение относительно поверхности морского дна 21. Далее включают привод 9 ходового винта 8 захватного устройства 5, раздвигают рычаги 12 с фиксаторами 15 и снимают захватное устройство 5 с корпуса 19 грузового бункера-накопителя 18. Все операции по управлению осуществляют дистанционно с базового судна 1. Далее таким же образом осуществляют последовательный спуск при помощи захватного устройства 5 и лебедки 2, установленной в центре судна обеспечения 1 на поверхность морского дна 21 бокса-ангара 47, с размещенными в его секциях-ячейках 48 автономными роботами-сборщиками 24 и распределительного устройство 32 с размещенными на его платформе 35 трансформаторными батареями 34, катушками 33 и шагающими роботами-отбойщиками 23 (фиг.1, 2). При этом распределительного устройство 32 с размещенными на его платформе 35 шагающими роботами отбойщиками 23 размещают на морском дне 21 в зоне локации кобальтомарганцевых корок, что требует горизонтирования устройства домкратами 22. В процессе спуска перечисленных устройств одновременно происходит разматывание кабелей 3, оснащенных оптико-волоконными каналами связи, лебедок 2, размещенных на носу и корме судна и связывающих указанные устройства с центром группового программного управления базового судна 1 (на чертеже не показана). Управление всеми роботами- шагающими роботами-отбойщиками 23 и автономными роботами сборщиками 24 осуществляется по заранее составленной управляющей программе. По кабель-тросам 3,оснащенным оптико-волоконными каналами связи, передается

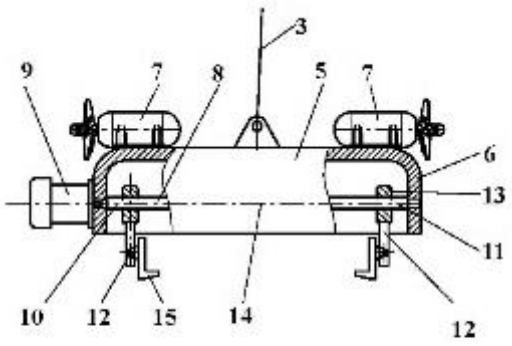
видео, информация телеметрии и сигналы управления всеми системами комплекса шагающими роботами-отбойщиками 23 [63-64], автономными роботами-сборщиками 24 и т. п. Система «технического зрения»- цифровая видео камера 43 и прожектор 44 для получения видеоинформации об объектах внешней среды с целью их обнаружения и идентификации размещена непосредственно на корпусе 19 автономных роботов сборщиков 24. Далее по кабель-тросам 3 лебедок 2, размещенных на носу и корме базового судна 1 из центра группового программного управления передается сигнал к началу работы автономных роботов-сборщиков 24 и шагающих роботов-отбойщиков 23. По кабелю 31 от трансформаторных батарей 34 подается питание шагающим роботам-отбойщикам 23 и начинается процесс их шагания (фиг. 1) за счет последовательного перемещения лап 26, с закрепленными на них шарнирами 30 грейферами 29, шарнирно-рычажных механизмов 27 гидроцилиндрами 28.Одновременно с этим происходит разматывание кабелей 31 с катушек 33, обеспечивающее возможность движения шагающих роботов-отбойщиков 23 в разных направлениях на значительные расстояния по склону залегания кобальтомарганцевых корок. В нужном положении, дистанционно определяемом оператором с базового судна 1, фиксируют положение каждого шагающего робота-сборщика 23, создавая достаточные усилия прижатия челюстей грейферов 29, гидроцилиндрами 28 к поверхности залегания полезного ископаемого 17- кобальтомарганцевых корок (фиг. 1, 4). Далее включается ударник 25 и начинается процесс разрушения крепких кобальтомарганцевых корок [37-38] и отделение их от скальных твердых пород залегания. Получив сигнал к началу работы из центра группового программного управления, размещенного на базовом судне 1,включаются водометные движители 38, работающие от аккумуляторных батарей 45, автономных роботов-сборщиков 24 (фиг. 5) и они покидают секции-ячейки 48, «вылетая» из бокса-ангара 47, оставаясь при этом телекомуникационно с ним связанным. Управление движением автономных роботов сборщиков 24, осуществляется сигналами, посылаемыми гидроакустическим приемопередающим модулем 51 бокса-ангара 47, снабженного собственным блоком питания 49 и принимаемые гидроакустическими

приемопередающими устройствами 46, размещенными в корпусе 19 автономных роботов-сборщиков 24. Контроль положения, скорость движения, точное позиционирование автономных роботов-сборщиков 24, «зависание» в горизонтальном положении, благодаря наличию системы регулирования плавучести (на чертеже не показана),на определенной глубине осуществляется изменением угла наклона водометных движителей 38, установленных в направляющих 39 (фиг. 6, 7), с возможностью поворота последних не менее чем на 130 градусов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях относительно корпуса 19. Автономная навигации автономных роботов- сборщиков 24 осуществляется использованием системы «технического зрения», включающей цифровую видеокамеру 43, транслирующую видео в реальном времени и прожектор 44 (фиг. 5). Оснащённые ею автономные роботы- сборщики 24 самостоятельно осуществляют «визуальный» контроль местности, сравнивая текущую картину с информацией, предварительно загружаемой из онлайн-сервисов. Таким образом определив объект поиска автономный робот-сборщик 24 захватом схватом 42, шарнирно закрепленным на механическом манипуляторе 41, захватывает раздробленные ранее шагающими роботами-отбойщиками 23 кобальтомарганцевые корки и поворотом механического манипулятора 41относительно центра сферического шарнира 40 отправляет удерживаемые куски в отсек-коллектор 36. При полном заполнении отсека-коллектора 36 автономный робот-сборщик движется к грузовому бункеру-накопителю 18, «зависает» над ним, благодаря системе регулирования плавучести, открывает крышки 37, добытое полезное ископаемое высыпается в грузовой бункер-накопитель 18 (фиг. 1, 7), а автономный робот-сборщик 24 возвращается за новой порцией полезного ископаемого. Когда заряд аккумуляторной батареи 45 автономного робота-сборщика 24 составит примерно 10% от начального, автономный робот-сборщик отправляется в свою секцию ячейку 48 бокса-ангара 47 для подзарядки от зарядной станции 50. Процесс сбора полезного ископаемого 17 продолжается до полного заполнения грузового бункера накопителя 18. После полного заполнения грузового бункера-накопителя 18 при помощи захватного устройства 5(фиг.3), кабель-троса

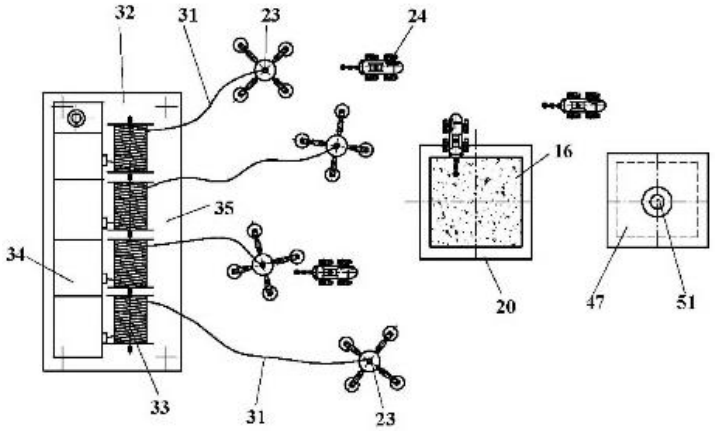
3 и лебедки 2, размещенной в центре базового судна 1 его поднимают на борт, разгружают и складируют в трюме базового судна, а затем переправляют на берег для дальнейшей переработки. Предлагаемый комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых является универсальным и может быть использован при добыче железомарганцевых конкреций. В этом случае используют только грузовой бункер накопитель 18, бокс-ангар 47 с автономными роботами-сборщиками 24, устанавливаемые на морском дне при помощи захватного устройства 5. Предлагаемый комплекс позволяет повысить производительность добычи рассредоточенных полезных ископаемых за счет исключения многократных спускоподъемных операций, является экологически безопасным, не нарушающим целостность морской среды [34-36].



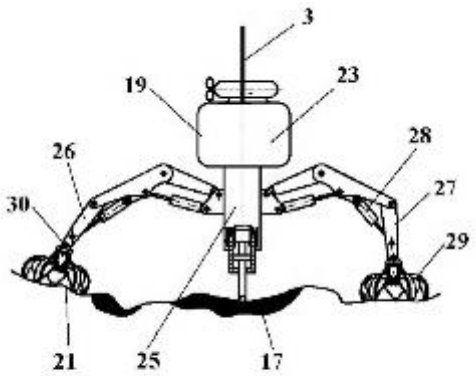
Фиг.1



Фиг.3

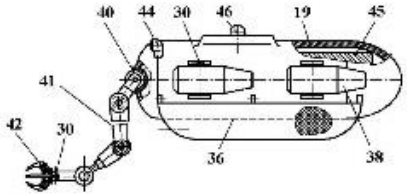


Фиг.2

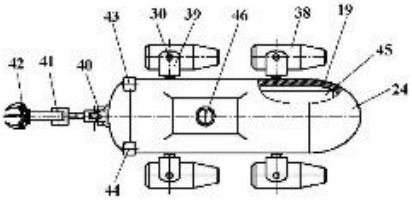


Фиг.4

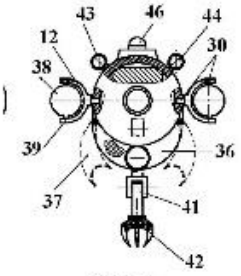
Рисунок 4.1 – Патент «Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых», начало [58]



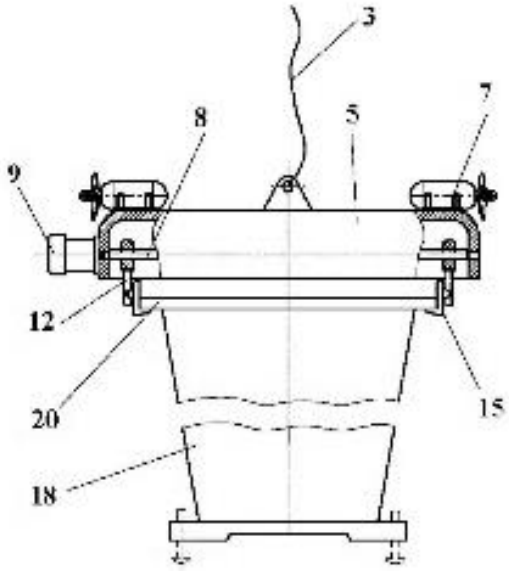
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8

Рисунок 4.2 – Патент «Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых», продолжение [58]

4.2 Подъемная установка для глубоководной добычи твердых полезных ископаемых

Подъемная установка для глубоководной добычи твердых полезных ископаемых [66] включает базовое судно 1 (рисунок 4.3) на корме 2 которого размещен приводной шкив трения 3, снабженный футеровкой 4.

Грузонесущий трос 5 огибает приводной шкив трения 3 и отклоняющие шкивы 6, установленные на корме 2 базового судна 1 и направляющие шкивы 7, размещенные по бортам 8 базового судна 1 Свободные концы 9 грузонесущего троса 5 соединены с бункерами-накопителями 10 прямоугольной формы с клинообразным дном 11 (фиг. 1, 2).

Передние стенки 12 бункеров-накопителей 10 жестко связаны с муфтами скольжения 13, в нижней части выполнены с разгрузочными отверстиями 14,

снабженными подвижными затворами 15 (фиг. 3, 4), оснащенными автоматической системой управления их перемещений (на фигуре не показана).

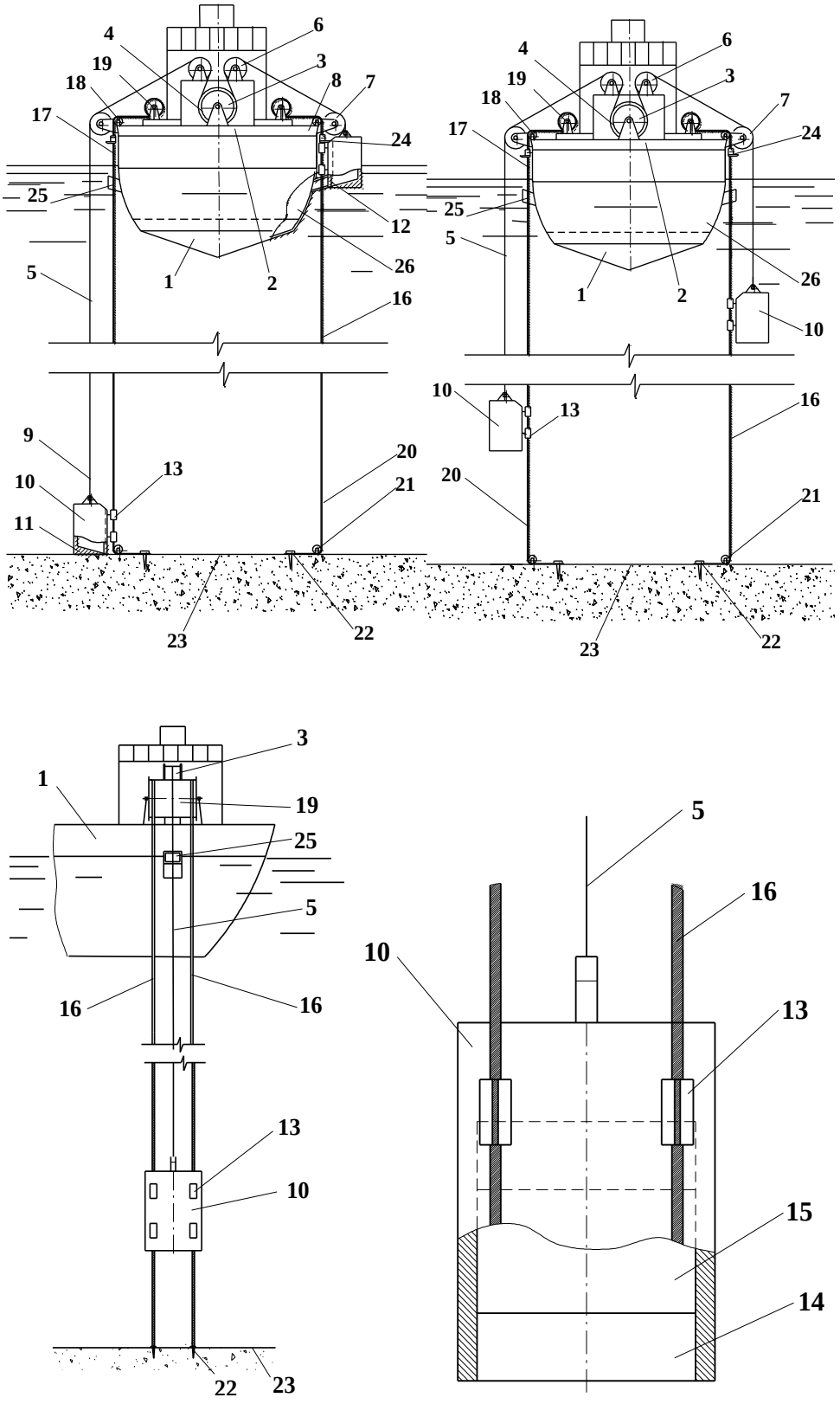


Рисунок 4.3 – Подъемная установка для глубоководной добычи твердых полезных ископаемых [66]

Муфты скольжения 13 подвижно связаны с параллельными относительно друг друга гибкими направляющими 16, попарно размещенными вдоль бортов 8 базового судна 1 (фиг.5, 6). Верхние концы 17 гибких направляющих 16 через направляющие блоки 18 запасованы на приводных барабанах 19, размещенных на корме 2 базового судна 1, а нижние концы 20, через отклоняющие блоки 21 и придонные якоря 22, закреплены на морском дне 23 (фиг. 1, 2).

Параллельные гибкие направляющие 16 снабжены датчиками ограничения хода 24 бункеров-накопителей 10, а базовое судно 1 оборудовано, размещенными по его бортам 8, загрузочными лотками 25, связанными с трюмом 26(фиг. 1, 5).

Подъемная установка для глубоководной добычи твердых полезных ископаемых работает следующим образом. Базовое судно 1, на корме 2 которого размещены приводной шкив трения 3, с грузонесущим тросом 5 и отклоняющие шкивы 6, а также установленные по бортам 8 направляющие шкивы 7, приводные барабаны 19, с запасованными на них верхними концами 17 гибких направляющх 16, приплывает к предварительно подготовленному участку разработки твердых полезных ископаемых, например железомарганцевых конкреций и начинают процесс спуска и установки на морском дне 23 гибких направляющих 16 (фиг. 1, 2),

Вращением приводных барабанов 19, пропуская гибкие направляющие через направляющие блоки 18 и отклоняющие блоки 21 закрепляют нижние концы 20 гибких направляющих 16 придонными якорями 22 на морском дне 23. Со стороны каждого из бортов 8 базового судна 1 устанавливают по две гибких направляющих 16, параллельные друг другу (фиг. 5).

Свободные концы 9 грузонесущего троса 5 соединяют с бункерами-накопителями 10 прямоугольной формы с клинообразным дном 11 и начинают их спуск (фиг. 2). При этом грузонесущий трос 5 огибает приводной шкив трения 3, жестко с ним не связан и приводится в движение силами трения, возникающими между вращающимся приводным шкивом трения 3 и прижатым к нему силами натяжения грузонесущим тросом 5. Наличие отклоняющих шкивов 6 обеспечивает необходимый угол обхвата приводного шкива трения 3 и его надежное фрикционное сцепление с грузонесущим тросом 5 по условию его не

проскальзывания относительно приводного шкива трения 3. Наличие футеровки 4 увеличивает тяговую способность приводного шкива трения 3 (фиг. 1, 2).

Таким образом, при вращении приводного шкива трения 3 происходит одновременное перемещение бункеров-накопителей 10, прикрепленных к свободным концам 9 грузонесущего троса 5, в двух противоположных направлениях, вверх и вниз (фиг. 2). Движение бункеров-накопителей 10 осуществляется вдоль параллельных относительно друг друга, гибких направляющих 16, охватываемых муфтами скольжения 13 (фиг. 6), что обеспечивает их фиксированное положение относительно бортов 8 судна обеспечения 1, исключает возможные удары о борт 8 при спуске и подъеме, а также исключает возможность запутывания ветвей грузонесущего троса 5.

Когда порожний бункер-накопитель 10 оказывается на морском дне 23 (фиг.1) подводные управляемые роботы (на чертеже не показаны) начинают его заполнение добываемым твердым полезным ископаемым, например железомарганцевыми конкрециями. В это время загруженный бункер-накопитель 10 достигает положения, соответствующего совмещению разгрузочного отверстия 14 бункера-накопителя 10 и загрузочного лотка 25, связанного с трюмом 26 базового судна 1, входит в контакт с датчиком ограничения хода 24, что ведет к остановке приводного шкива трения 3 и срабатыванию автоматической системы управления (на чертеже не показана) перемещением подвижного затвора 15 (фиг.3, 4). Подвижный затвор 15 перемещается вдоль передней стенки 12 бункера-накопителя 10 и открывает разгрузочное отверстие 14.

Находящееся в бункере-накопителе твердое полезное ископаемое по клинообразному дну 11 и загрузочному лотку 25 поступает непосредственно в трюм 26 базового судна 1 (фиг. 1).

По завершению цикла, когда один бункер-накопитель будет поднят и разгружен, а другой опущен и загружен подъемная установка реверсируется и бункеры-накопители начинают двигаться в противоположных направлениях (фиг. 2).

Предлагаемая подъемная установка для глубоководной добычи твердых полезных ископаемых обеспечивает непрерывный цикл доставки твердых полезных ископаемых с морского дна непосредственно в трюм базового судна без использования каких-либо промежуточных перегрузочных устройств, бункеров, питателей и т.п., что значительно повышает эффективность спускоподъемных операций, а наличие параллельных гибких направляющих вдоль которых перемещаются бункеры-накопители полезного ископаемого исключает возможность запутывания ветвей грузонесущего троса и гарантирует надежность и безопасность работы подъемной установки.

4.3 Параметры опытного образца комплекса для глубоководной добычи полезных ископаемых

Представленные в двух предыдущих подразделах технологии [58, 66] могут являться основой для создания опытного образца, однако для дальнейшей работы необходим высокоэффективный способ подъема с минимальными временными затратами, чтобы обеспечить рентабельную производительность свыше 500000 тонн в год [].

Во второй главе диссертации проводился анализ главного критерия – плотности распределения конкреций q, на который стоит обратить внимание при использовании комплекса добычи, имеющего в составе передвижной спредер. Плотность распределения конкреций на квадратный метр не должна превышать 10 кг/м^2, в случае с большой величиной критерия – разница в годовой производительности, при сравнении добычи ЖМК по способу смены участка, менее выражена. Для обоснования вышесказанного необходимо произвести расчет по имеющимся входным данным.

Расчет производительности комплекса следует начинать с параметров канатной установки и полезной массы конкреций. В качестве каната используется кабель-трос с арамидной оплеткой. Входные данные подъемной установки опытного образца, предоставленные АО «Центр Перспективных Технологий» представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры тросовой установки (составлено автором)

Запас прочности	2
Разрывное усилие, не менее	2500 кН
Максимальная рабочая нагрузка, не более	2000 кН
Расчетная масса кабеля в воздухе	2600 кг/км
Расчетная плавучесть кабеля в морской воде (при атмосферном давлении)	20 кг/км
Диаметр кабеля	0,06 м

Предлагаемый канат (кабель-трос) в качестве силового элемента имеет жгут из арамидных нитей 316 текс (5220 штук). Арамидные кабель-тросы обладают рядом преимуществ, включая высокую прочность, малый вес, устойчивость к растяжению и износу, а также химическую и температурную стойкость. Эти свойства делают их идеальными для различных применений, где требуется прочный и надежный кабель. Таким образом, три лебедки с выбранным кабель-тросом, установленные в разных частях судна, позволят выполнять спускоподъемные операции оборудования и обеспечивать его электропитание. Дальнейший расчет будет касаться грузоподъемных характеристик кабель-троса.

По методикам расчетов из второй главы необходимо определить сколько составляет полезный вес ТПИ - сколько способен поднять такой кабель-трос. Перед этим следует выполнить расчет всех составляющих общей формулы полезного веса конкреций. Так, максимальная допустимая рабочая нагрузка с учетом запаса прочности 2 составляет:

$$F_{\max} = \frac{2500000}{2} = 1250000 \text{ (Н)}, \quad (4.1)$$

При использовании обтекателя эллипсоидной формы с радиусом, соответствующем половине самой длинной стороны бункера (r = 2,5 м) сила сопротивления при подъеме цилиндрического контейнера со скоростью 3 м/с рассчитывается по формуле (1.4):

$$F_{\text{гидр}} = 0{,}45 \cdot \frac{1025 \cdot 3^2}{2} \cdot 3{,}14 \cdot 2{,}5^2 = 40734 \text{ (Н)}$$

Рассчитаем силу сопротивления каната при подъеме для длины каната 5000 метров (соответствует глубине погружения) и диаметру из выходных данных по формуле (2.6):

$$F_{\text{к}} = 0{,}05 \cdot \frac{1025 \cdot 3^2}{2} \cdot (5000 \cdot 0{,}06)^{\frac{2}{3}} = 9950 \text{ (Н)}$$

Рассчитаем динамическую силу натяжения каната, возникающую при начальной скорости рывка. Согласно справочным данным справочника «Судовые устройства» коэффициенты k_f и k_b устанавливаются исходя из величины μ - отношения массы подвижной части (или приведённой массы) к массе каната. В случае с предлагаемым канатом величина μ рассчитывается как (4.2):

$$\mu = \frac{G_{\text{отн.}}}{M_{\text{к}}} = \frac{100000}{100} = 1000, \qquad (4.2)$$

В соответствии со справочной литературой при μ > 24: b = 1, f = 1. Для арамида марки Kevlar 29 и Kevlar 49 модуль упругости материала E в диапазонах соответственно: 70-83 ГПа и 120-130 ГПа. Для расчета принимается величина 130 ГПа. Площадь поперечного сечения каната $S_{\text{кан}}$ согласно диаметру каната составляет 0,0028 м^2. Таким образом, динамическая сила при натяжении каната составляет, согласно формуле (1.3):

$$F_{din} = \frac{1{,}3 \cdot 10^{11} \cdot 0{,}0028 \cdot 3 \cdot (1 + 1 \cdot \sqrt{1000})}{\sqrt{\frac{1{,}3 \cdot 10^{11} \cdot 0{,}0028 \cdot 5000}{100}}} = 264064 \text{ (Н)}$$

По полученным составляющим расчета полезного веса конкреций, рассчитаем финальное значение веса собранных ЖМК в контейнере (вес контейнера $G_{\text{конт}}$ – 10 тонн) согласно формуле (1.2):

$$F_r = 1250000 - 264064 - 98100 - 40734 - 981 - 9950 = 836171 \text{ (Н)}$$

Таким образом, преобразив полезный вес контейнера в массу, можно сделать вывод, что выбранный канат позволит поднимать 85 тонн собранных ЖМК, уже с учетом иных весовых и силовых характеристик.

Участок конкреций следует принимать 700х700 метров, поскольку радиус охвата глубоководных мини-роботов «особей» в составе комплекса «РОЙ» составляет 300-350 м. Приняв для расчета плотность распределения конкреций 5 кг/м^2, масса конкреций с одного участка (4.3):

$$M_i = qS_{\text{уч.}} = 5 \cdot 700 \cdot 700 = 2450000 \text{ (кг)}, \quad (4.3)$$

На рисунках 4.4 и 4.5 представлены схемы участков добычи ЖМК с упрощенным алгоритмом смены участка по мере выработки, представлена увеличенное расположение оборудования в центре обозначенного участка.

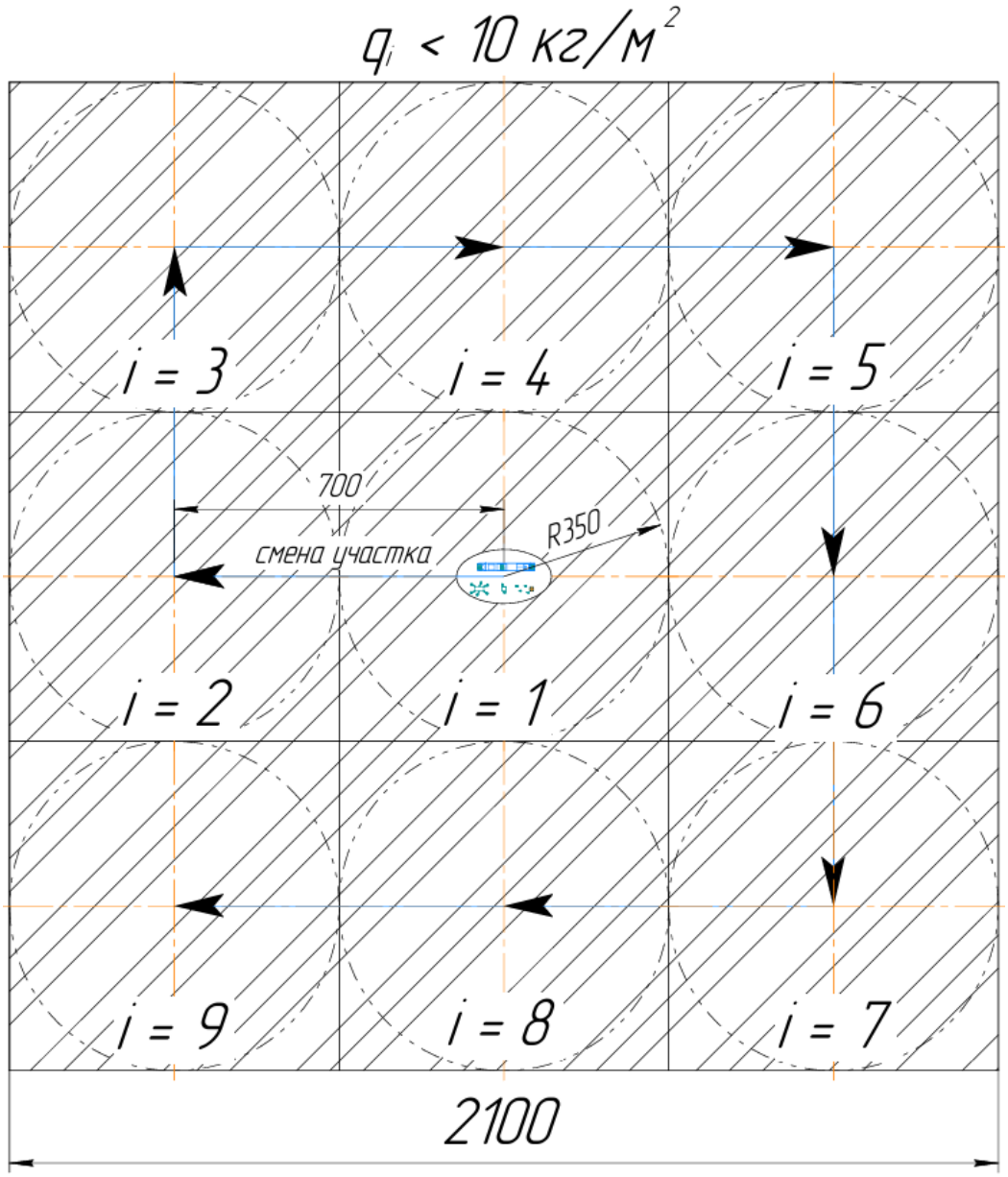


Рисунок 4.4 – Алгоритм отработки участков добычи ЖМК (составлено автором)

Анализ вариантов исполнения добычного комплекса, проведенный в предыдущих главах, позволяет утверждать, что использование представленной компоновки по критерию плотности распределения ЖМК меньше 10 кг/м^2, критерию глубины залегания - 5000 метров и критерию линейной скорости подъема/спуска лебедкой – 3 м/с целесообразно и должно применяться при проектировании опытного образца.

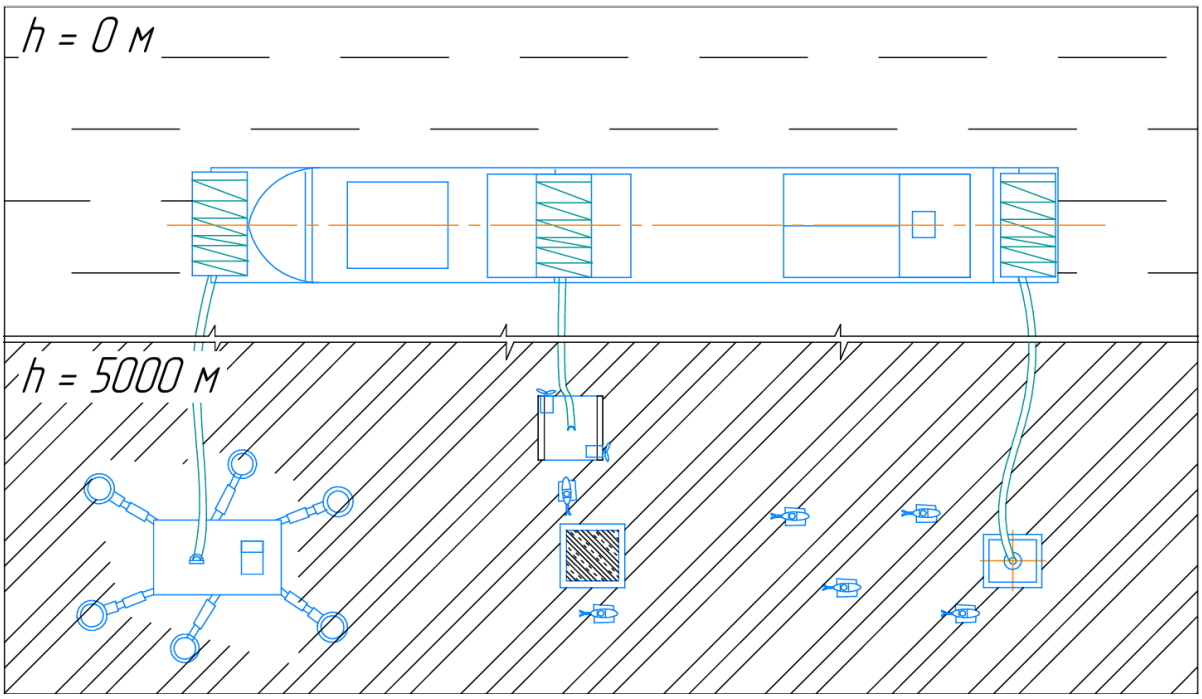


Рисунок 4.5 – Расположение комплекса добычи ЖМК (составлено автором)

На представленных схемах изображена разметка участков (квадраты 700х700 м) и дальность применения системы сбора «РОЙ» (окружность пунктиром, радиусом 350 м). При отработке участка, а именно подъема массы ЖМК с участка M_i технология предполагает перемещение последнего недозаполненного бункера и оборудования передвижным шагающим спредером на следующий участок в обход полного цикла подъема, разгрузки, спуска. И таким образом, за счет перемещения оборудования по дну, минуя вышеперечисленные операции, производительность добычи возрастает. Однако требуется рассчитать скорость передвижения шагающего устройства и производительность комплекса с таким способом смены участка.

В первую очередь, цикл добычи начинается со спуска оборудования (передвижной спредер, бункер для сбора ЖМК, автономную станцию «РОЙ») в

центр определенного ранее участка. Для спуска бункера и вспомогательного оборудования используется самонаводящаяся рама-крышка с ходовыми винтами, имеющая несколько винтовых движителей для центрирования при спуске. В качестве системы навигации используются четыре репера.

Для расчета винтовых движителей крышки воспользуемся техническими данными гидроэлектропривода (ГЭП), представленными в таблице 4.2, и методикой расчета диаметра винта и его упора.

Таблица 4.2 – Технические данные ГЭП, производства ООО «ГИКО» (составлено автором)

Показатель	**Значение**
1. Мощность, кВт	11
2. Давление, бар макс.	200
3. Расход, л/мин макс.	40
4. Объем гидробака, л	12

Для подбора гидромоторов подруливающих устройств необходимо определить потребный момент и обороты на гребном винте. Согласно справочнику Александрова М.Н. «Судовые устройства» [2] при известных величинах мощности привода $N_в$, потребной тяги устройства $T_у$ и целевой скорости $v_р$ перемещения рамы с определяется диаметр гребного винта по формуле (1.7). Коэффициента сопротивления формы туннеля определяется из зависимости на рисунке 4.6.

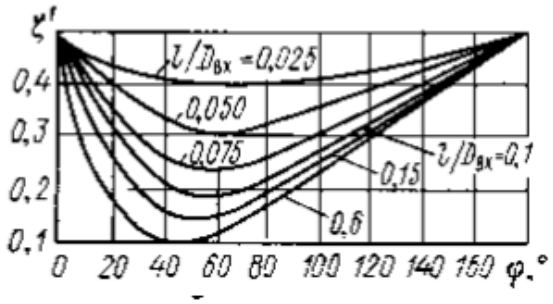


Рисунок 4.6 – Зависимость коэффициента сопротивления формы туннеля от угла сопловой части (конфузора) [2]

Для подруливающего устройства с прямой формой туннеля $\varphi^0 = 0$, исходя из графика принимаем значение 0,5. В таблице 2 сведены результаты вычислений

упора винта исходя из максимально возможного гидродинамического сопротивления. В целях упрощения расчета было принято считать, что площадь воздействия винта S составляет 2,7 м^2. Вес рамы *G* составляет 15 кН. Упор винта рассчитан по формуле (2.19):

$$T_{\text{у}} = \frac{0{,}5(1{,}28 \cdot 1000 \cdot 0{,}5^2 \cdot 2{,}7)}{1 - 0{,}06} + 1500 \cdot tg(4) = 565 \text{ (Н)}$$

где t = коэффициент засасывания (для тихоходных катеров (10-25 км/ч) принимается как 0,06).

По имеющимся параметрам и ограничением по мощности в 3,5 кВт (Всего предусмотрено 3 винта, а мощность ГЭП – 11 кВт) расчетный диаметр гребного винта равен для упора 565 Н равен по формуле (1.7):

$$D_{\text{в}} = (\frac{565}{0{,}5})^{3/2} \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot 1000 \cdot 3500}} = 0{,}22 \text{ (м)}$$

Выберем гребной винт лодочного мотора соответствующего диаметра: Винт гребной для Tohatsu 9.8HP, 8.9*8.5 алюминий (Диаметр 0,226 м, шаг винта – 8,5 дюйма). По диаметру винта была сделана выборка моделей с разным шагом винта $H_{\text{в}}$, исходя из данных можно определить частоту вращения винта по формуле:

$$n_{\text{в}} = \frac{v}{H_{\text{в}}}, \qquad (4.4)$$

где *v* – скорость передвижения рамы с бункером, м/с,

*H*в – шаг винта, дюйм.

Таблица 4.3 – Рассчитанные характеристики винтов (составлено автором)

v, м/с	**$T_{\text{у}}$, Н**	**$D_{\text{в}}$, м**	**$H_{\text{в}}$, дюйм**	**n, об/мин**
0,5	565	0,226	5	236
			7	169
			9	131
			11	107
			13	90

Продолжение таблицы 4.3

v, м/с	**$T_у$, Н**	**$D_в$, м**	**$H_в$, дюйм**	**n, об/мин**
0,5	565	0,226	15	78
			17	69
			19	62
			21	56
			23	51

С учетом требуемого упора винта в 565 Н и диаметр в 0,226 м, получаем крутящий момент на валу приводного гидромотора М=65 Нм. Тогда требуемые параметры гидромоторов можно свести в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Параметры гидромоторов (составлено автором)

Показатель	**Значение**
1. Требуемый момент, Нм	65
2. Частота вращения, об/мин	236-51
3. Номинальная мощность, кВт	1,5 – 0,35
4. Максимальна частота возможная для мощности 3,5 кВт, об/мин	500

4.4 Расчет скорости шагающего спредера

Следующим этапом расчета общего цикла добычи является установление времени перемещения бункера и автономной станции сбора ЖМК с участка на участок передвижным спредером. Поскольку устройство двигается за счет гидроприводов, необходимо выполнить расчет скорости выдвижения штоков гидроцилиндров и согласно алгоритму выдвижения рычагов-манипуляторов спредера, рассчитать время, затрачиваемое на каждую фазу перестановки рычага. Окончательная скорость ПС будет получена путем деления приблизительного расстояния, на которое передвинется устройство за все фазы перемещения рычагов-манипуляторов на общее количество затрачиваемого времени на эти манипуляции.

Расчет объема поршневой полости гидроцилиндра и подбор необходимой подачи следует начинать с определения требуемого суммарного усилия, воздействующего на рычаги-манипуляторы ПС при вертикальном выдвижении штока, приложенного к рычагу-манипулятору (позиция 1, рис. 2.9) по формуле (2.8):

$$F^{y}_{\text{сум. усил.}} = 9{,}81 \cdot 1{,}25 \cdot ((85000 + 10000 - 1025 \cdot 2{,}5) = 1133515(\text{Н})$$

Заданная площадь миделева сечения спредера для расчета величины гидродинамического сопротивления составляет:

$$S_{\text{зад.}} = a_{\text{бунк.}} b_{\text{бунк.}} k_{S\text{спр.}} = 3 \cdot 2 \cdot 1{,}5 = 7{,}5\ (\text{м}^2), \qquad (4.5)$$

где $a_{\text{бунк.}}$ – ширина бункера, м,

$b_{\text{бунк.}}$- высота бункера, м,

$k_{\text{Sспр.}}$- коэффициент площади спредера для учета его сечения в вычислениях (составляет 1,25).

Количество рычагов передвижения N = 6, требуемая толкающая сила штока поршня гидроцилиндра подъема $F^{y}_{\text{рычаг}}$ будет равняться усилию, прилагаемому к рычагу при количестве точек опоры $N_{\text{оп}}$ = 3. Количество точек опоры выбрано исходя из требуемого минимального количества рычагов-манипуляторов при подъеме остальных с сохранением устойчивого положения спредера. Таким образом, в момент поднятия 3-х рычагов-манипуляторов, на оставшиеся приходится сумма всех масс под которую и будут рассчитаны гидроцилиндры. Расчет выполняется по формуле (2.9), куда в правую часть расчета $F_{\text{гидр}}$ подставляется $S_{\text{зад.}}$:

$$F^{y}_{\text{рычаг}} = \frac{1134281}{3} + \frac{0{,}45 \cdot 1025 \cdot 7{,}5 \cdot 3^2}{2} = 393661(\text{Н})$$

Требуемое минимальное значение диаметра поршня и штока гидроцилиндра определяется соотношениями (2.10 и 2.11):

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 393661}{\pi \cdot 58000000}} \cdot 1{,}1 = 0{,}102(м) = 102(\text{мм})$$

$$d = D \cdot 0{,}7 = 102 \cdot 0{,}7 = 72(\text{мм})$$

Для поршня длиной 1 метр объем поршневой полости определяется по формуле (2.12) и составляет:

$$V = 1 \cdot 3{,}14 \cdot \frac{0{,}102^2}{4} = 0{,}008(\text{м}^3)$$

Рассчитаем скорости движения поршня при подаче жидкости в поршневую $v_{\text{п}}$ и штоковую $v_{\text{ш}}$ полости (при учете коэффициента мощности $k_{\text{м}}$ = 0,85 и коэффициента потери времени на разгон и торможение k_t = 0,75) с использованием двух параллельно подключенных насосов с подачей каждого $Q_{\text{н}}$ – 0,00705 м^3/с по формулам (2.13 и 2.14):

$$v_{\text{п}} = \frac{4 \cdot 0{,}0141 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}75}{3{,}14 \cdot 0{,}0102^2} = 1{,}1(\text{м/с})$$

$$v_{\text{ш}} = \frac{4 \cdot 0{,}0141 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}75}{3{,}14 \cdot (0{,}102^2 - 0{,}072^2)} = 2{,}15(\text{м/с})$$

Полученная скорость движения поршня гидроцилиндра при подаче жидкости в штоковую или поршневую часть позволяет рассчитать общее время передвижения подвижного спредера на 2 метра, то есть определить его скорость.

Расчет времени, затрачиваемого на фазу перемещения ведется в зависимости от необходимости подачи в поршневую или штоковую полости гидроцилиндров и представлен формулой (4.6) в общем виде:

$$t_i = \sum_{n_{\text{ш}}} t_i^{\text{ш}} + \sum_{n_{\text{п}}} t_i^{\text{п}} = \sum_{n_{\text{ш}}} \frac{L}{v_{\text{ш}}} + \sum_{n_{\text{п}}} \frac{L}{v_{\text{п}}}, \qquad (4.6)$$

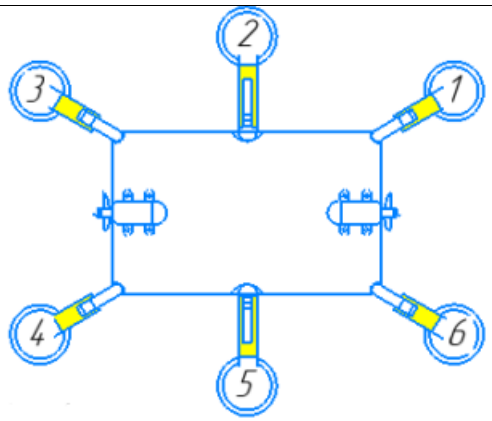
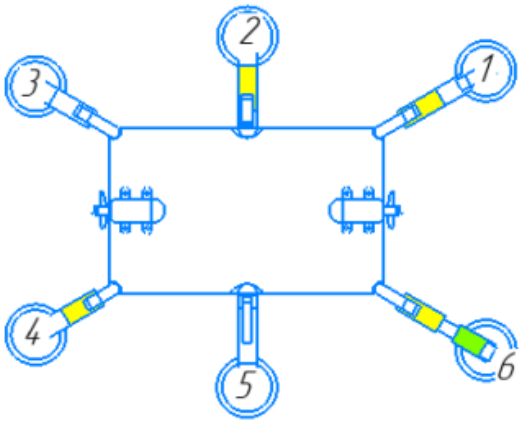
где $n_{\text{ш}}$ и $n_{\text{п}}$ – соответственно необходимое количество подачей жидкости в штоковую и поршневую полости,

L – длина хода поршня (1 метр).

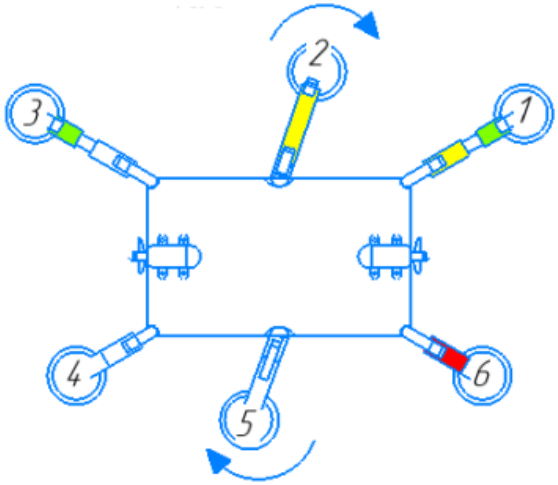
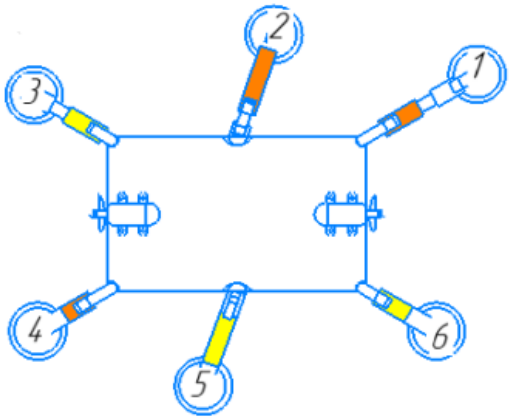
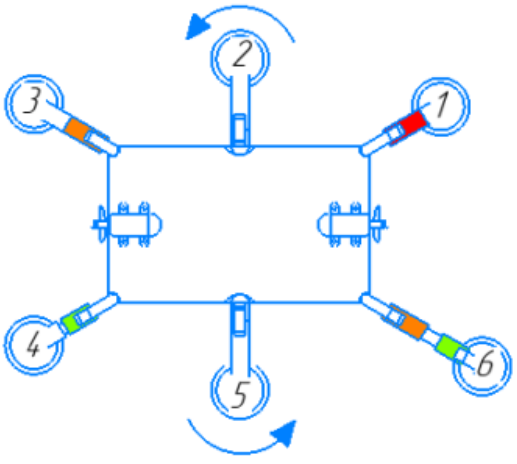
В таблице 4.5 представлено описание схемы передвижения шагающего подводного аппарата и время, затрачиваемое на каждую фазу. Цветами на представленных вставках выделены зоны ПС, осуществляющие свое движение, в зависимости от вида. На позиции 1 происходит подъема рычагов-манипулятор в положение «стоя». Далее в позиции 2 – в положении «стоя» выдвигается рычаг № 6. После этого он опускается на новое место и следует выдвижение рычагов №1 и

№3, причем рычаг №1 выдвигается в поднятом состоянии, а рычаг №3 не поднимаясь со дна. Последующие манипуляции рычагов происходят согласно выделенным зонам на спредере в таблице.

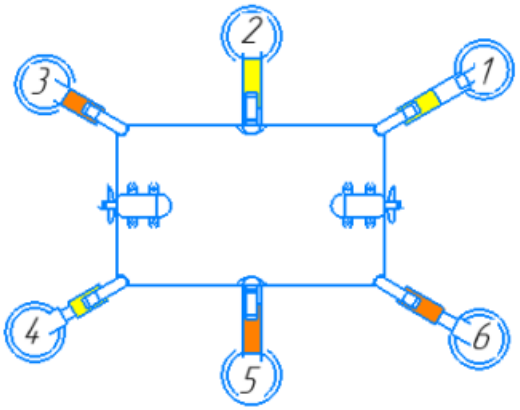
Таблица 4.5 – Описание схемы шагания передвижного спредера (составлено автором)

Легенда		
Поз. 1	Вертикальный подъем рычагов 1 – 6.	 $t_1 = \frac{1}{1{,}1} = 0{,}91$ (с)
Поз.2	Подъем, выдвижение, опускание рычага 6 → подъем рычагов 1, 2, 4.	 $t_2 = \frac{1}{1{,}1} + \frac{1}{1{,}1} + \frac{1}{2{,}15} + \frac{1}{1{,}1} = 3{,}2$ (с)

Продолжение таблицы 4.5

Поз. 3	Задвигание рычага 6 и выдвижение рычага 3, поворот рычага 5 в направлении движения, выдвижение рычагов 1, 2 в поднятом состоянии.	 $t_3 = 0{,}91 + 0{,}91 = 1{,}82$ (с)
Поз. 4	Опускание рычагов 1, 2, 4 → подъем рычагов 3, 5, 6.	 $t_4 = 0{,}91 + 0{,}47 = 1{,}38$ (с)
Поз. 5	Задвигание рычага 1, выдвижение рычага 4, поворот рычага 2 в направлении движения → рычаги 3, 5, 6 принимают положения для следующего движения	 $t_5 = 0{,}91 + 0{,}91 = 1{,}82$ (с)

Продолжение таблицы 4.5

Поз. 6	Опускание рычагов 3, 5, 6 → подъем рычагов 1, 2, 4. Повтор цикла движения с позиции 2.	 $t_6 = 0{,}91$ (с)
Полный цикл шагания		$\sum_{i=6} t_i = 10{,}07$ (с)

По результатам выполненных расчетов время передвижения ПС с бункером на другой участок с учетом коэффициента гидравлического сопротивления, полученного экспериментально и действующих на ПС сил сопротивления, составляет 58 минут, что в совокупности позволяет уменьшить время смены участка на 20 минут за 1 цикл отработки участка в сравнении с предыдущим расчетом во второй главе, где в качестве коэффициента было выбрано табличное значение (для прямоугольных сечений). Скорость ПС при данных параметрах составляет 0,2 м/с.

4.4 Расчет производительности добычного комплекса

Производительность добычного комплекса можно рассчитать, если известно время цикла добычи, включающее время спуска оборудования, время сбора ЖМК, время подъема оборудования, время разгрузки и по истечении ресурса на участке время смены участка добычи. Исходные и полученные путем вычислений временные характеристики представлены в таблице 4.6. Даны конкретные диапазоны зависящие от скоростных возможностей лебедки, передвижного спредера, мини-роботов в составе автономной станции «РОЙ». Принимаемое значение из диапазона будет влиять на целесообразность применения разных способов смены участка. Однако параметр время сбора конкреций носит динамический характер, поскольку плотность распределения

конкреций является критерием оценки применимости передвижного спредера в составе комплекса.

Таблица 4.6 – Составляющие времени цикла добычи одного участка (составлено автором)

Временная характеристика	Значение
Время спуска оборудования	$t_{\text{сп.}} = \frac{H}{v_{\text{л.}}} = [5000, 1666]$ (с)
Время подъема оборудования	$t_{\text{п.}} = \frac{H}{v_{\text{л.}}} = [5000, 1666]$ (с)
Время сбора конкреций	$t_{\text{сб.}} = [12000, 5400]$(с)
Время смены участка	$t_{\text{см.}} = \frac{(n_{\text{об.}} + 1) \cdot s}{v_{\text{спр.}}} = [11170, 10500\ ]$(с)
Время разгрузки конкреций	$t_{\text{р.}} = 600$ (с)

Для построения зависимостей (рисунок 4.7) и сравнения влияния выбираемого гидродинамического коэффициента на производительность, выбраны указанные в таблице 4.6 время смены участка – 11170 (для c_x = 1,1) и 10500 (для c_x = 0,45) секунд и время подъема и спуска оборудования – 5000 секунд.

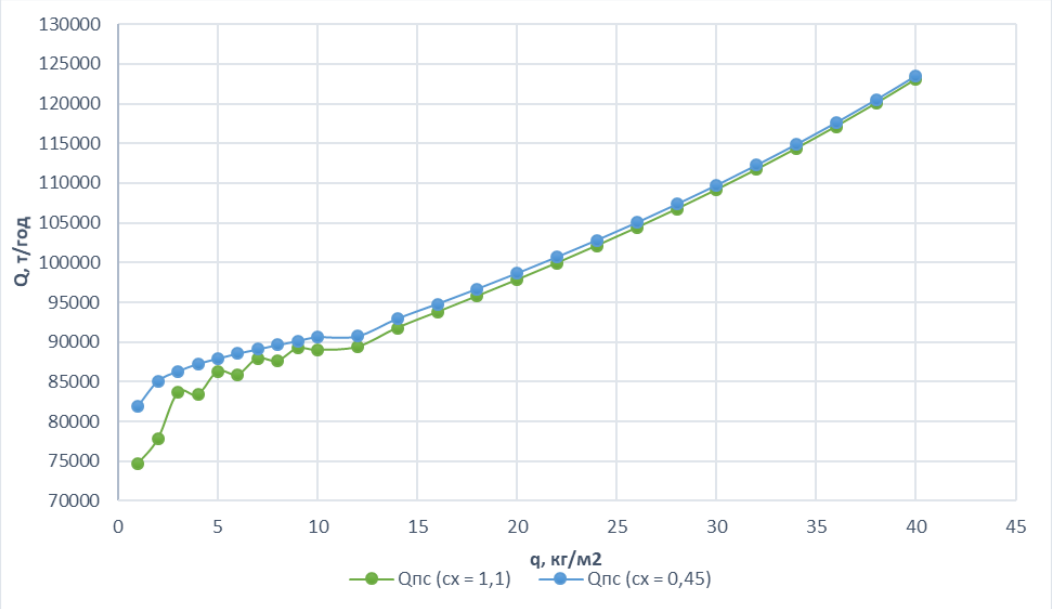


Рисунок 4.7 – Сравнение влияния величины гидродинамического коэффициента на производительность добычного комплекса (составлено автором)

Из графиков видно, что по мере приближения к q = 10 кг/м^2 разница в производительности сокращается, поскольку при увеличении плотности распределения конкреций выше 10, сокращается количество необходимых смен участка.

Чтобы рассчитать производительность добычного комплекса при стандартном способе смены участка (канатный подъем оборудования поочередно и перемещение судна на новый сектор) необходимо использовать формулу (2.33).

Подставив в выражение рассчитанные значения, можно сравнить производительность при разных способах смены участков добычи. Полученные зависимости представлены на рисунке 4.8 и 4.9. Основное различие зависимостей в критерии плотности распределения конкреций q.

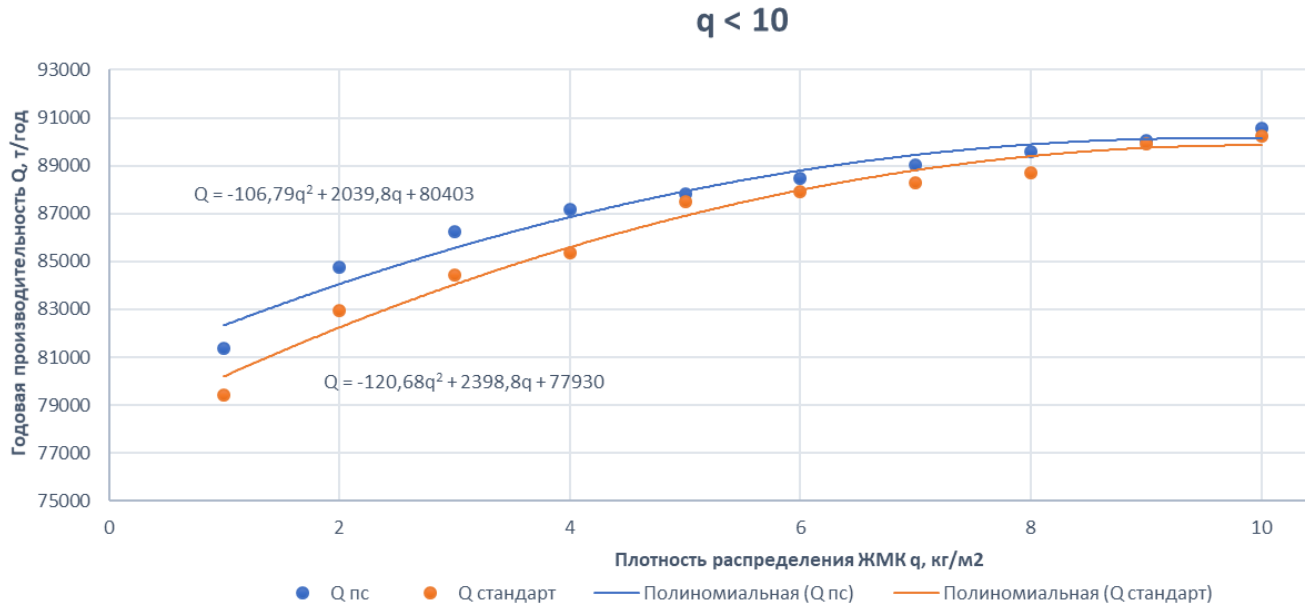


Рисунок 4.8 – Зависимости производительности от плотности распределения конкреций, величиной меньше 10 кг/м^2 при различающихся способах смены участка (составлено автором)

На полученных зависимостях рисунка 4.8 видно, что при скорости подъема 1 м/с и скорости передвижения спредера – 0,2 м/с технология добычи с подобной сменой участка оправдывает свою целесообразность для плотности распределения конкреций не более 10 кг/м^2.

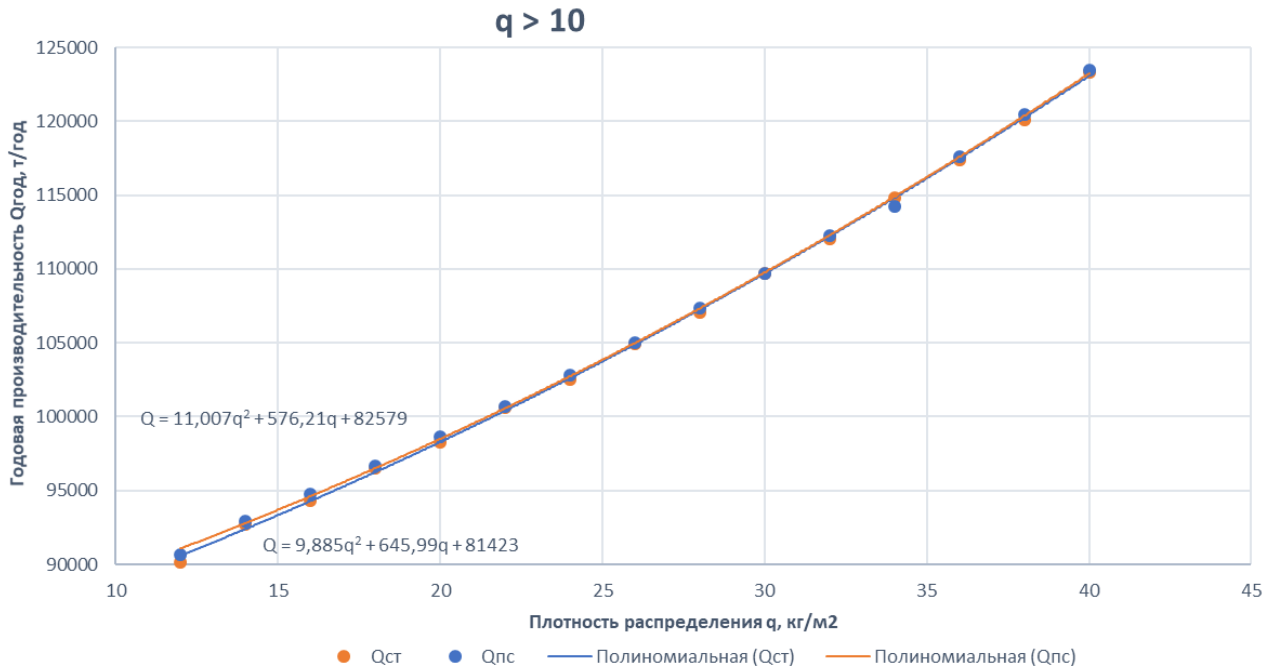


Рисунок 4.9 – Зависимости производительности от плотности распределения конкреций, величиной больше 10 кг/м^2 (составлено автором)

На рисунке 4.9 видно, что разрыв между зависимостями уменьшается по мере возрастания плотности распределения. Главные параметры, от которых зависит рост годовой производительности комплекса: скорость спускоподъемных операций (рисунок 4.10), глубина залегания ЖМК и скорость сбора ЖМК мини-роботами (рисунок 4.11).

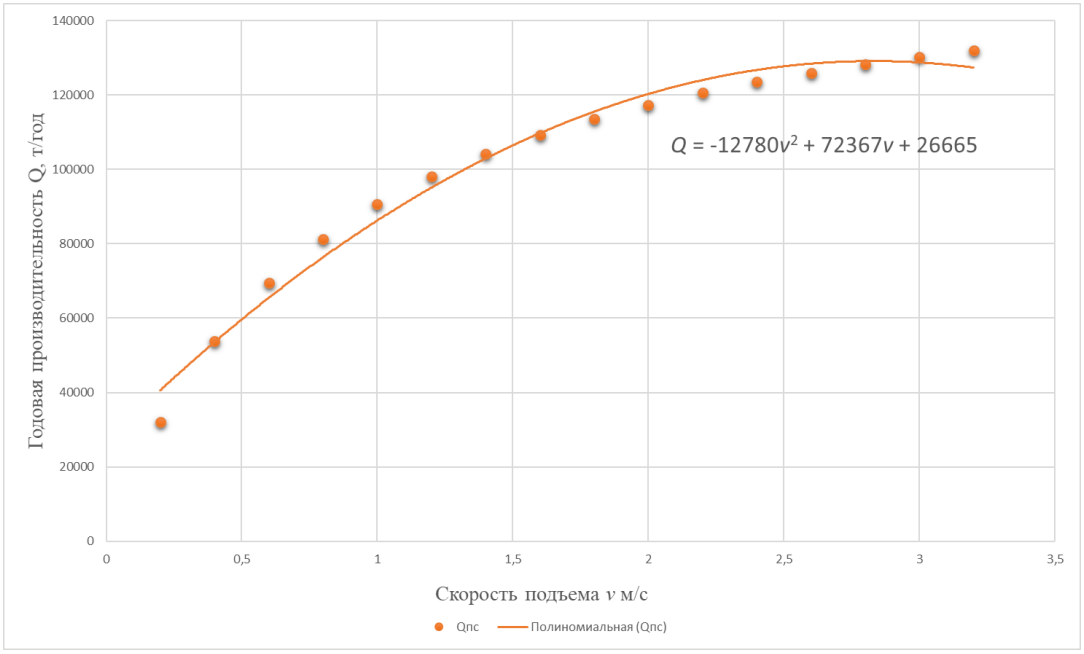


Рисунок 4.10 – Зависимость годовой производительности от скорости спускоподъемных операций (при q = 10) (составлено автором)

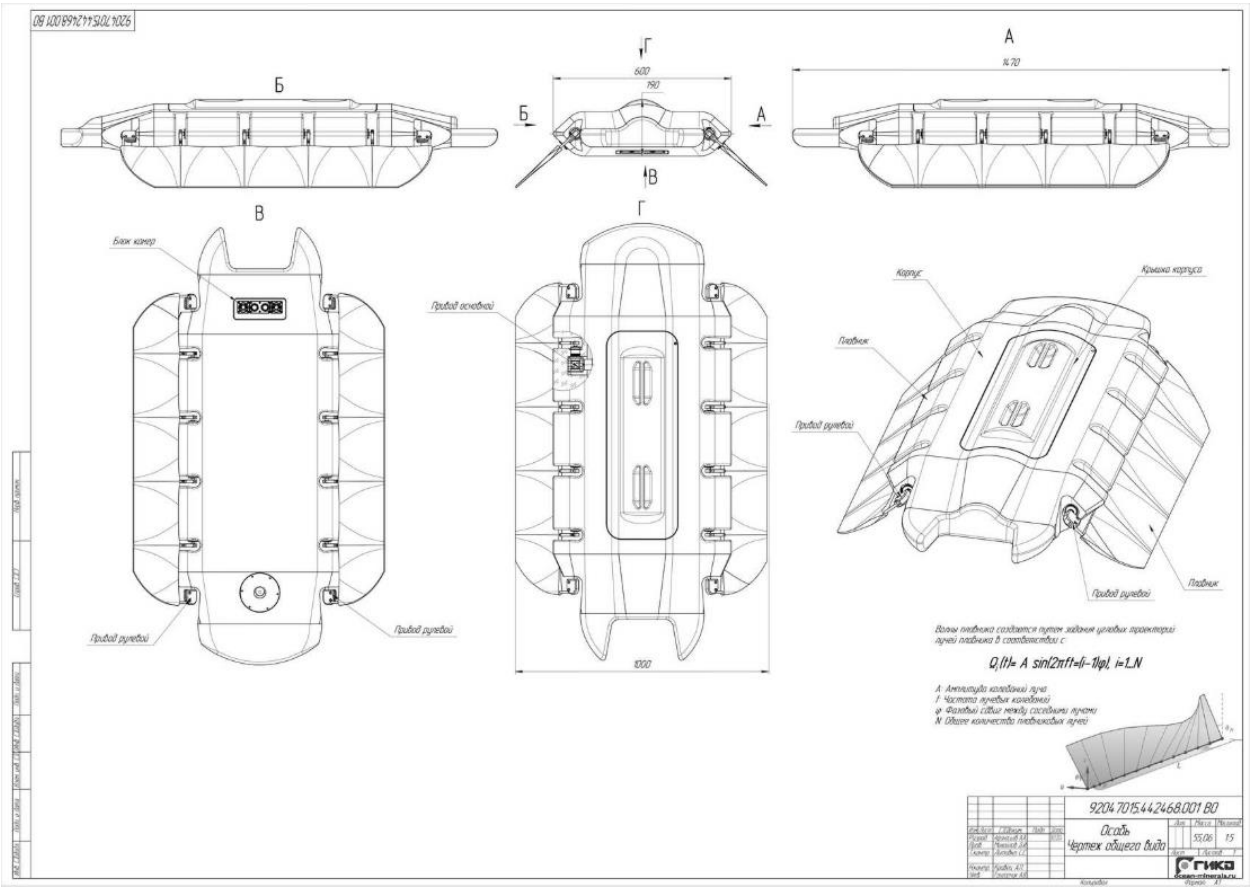


Рисунок 4.11 – Подводный мини-робот сборщик (фото автора)

Большей производительности можно достичь за счет использования двух бункеров для сбора ЖМК. В этом случае в цикле добычи процессы транспортировки первого бункера, наполненного ЖМК, для разгрузки на судне и спуска обратно будут идти параллельно с наполнением второго бункера ЖМК мини-роботами. В таком случае формула производительности (2.35) приобретает вид:

$$Q_{\text{год}}^{\text{ПС.}} = \frac{n_{\text{зап}} G}{\left(t_{\text{сб.}} n_{\text{зап}} + t_{\text{см.}} + t_{\text{сп.}}(n - n_{\text{зап}})\right) k_{\text{нав}}} \cdot \frac{t_{\frac{\text{ч}}{\text{год}}}}{3600}, \qquad (2.35)$$

Время спуска учитывается лишь в том отрезке, если дозаполнение одного бункера на следующем участке произошло быстрее спуска другого бункера - состояние простоя мини-роботов.

В таблице 4.7 представлены рекомендуемые условия комплекса для осуществления максимально возможной производительности добычи в условиях имеющегося оборудования.

Таблица 4.7 – Рекомендуемые условия для повышения производительности сбора (составлено автором)

Глубина залегания H, м	Время подъема/спуска $t_п$./$t_{сп}$, мин	Время смены участка $t_{см}$, мин	Плотность распределения ЖМК q, кг/м^2	Время цикла добычи $T_{ц}$, ч	Производительность добычи Q, т/год	Время сбора ЖМК при помощи «РОЙ», ч
5000	28	175	1	24	143568	3,3
			2	45	155197	3,3
			3	65	160365	3,3
			4	85	163754	3,3
			5	101	165467	3,2
			6	120	167931	3,2
			7	139	170146	3,2
			8	158	172214	3,1
			9	173	173654	3,1
			10	191	175635	3,1
			12	229	176300	3,1
			14	254	184648	2,9
			16	280	192271	2,8
			18	300	200092	2,7
			20	321	208898	2,6
			22	337	218107	2,5
			24	352	228495	2,4
			26	362	239527	2,3
			28	372	252025	2,2
			30	377	265494	2,1
			32	381	280862	1,9
			34	380	298060	1,8
			36	379	317068	1,7
			38	375	339112	1,6
			40	367	363913	1,5

Глубина залегания ЖМК – 5000 метров и время подъема или спуска – 28 минут (для скорости лебедки - 3 м/с) в наименьшей степени влияют на производительность при использовании технологии сбора с двумя бункерами и непрерывным сбором ЖМК.

На рисунке 4.12 представлен график производительности комплекса добычи ЖМК, при использовании двух бункеров для сбора.

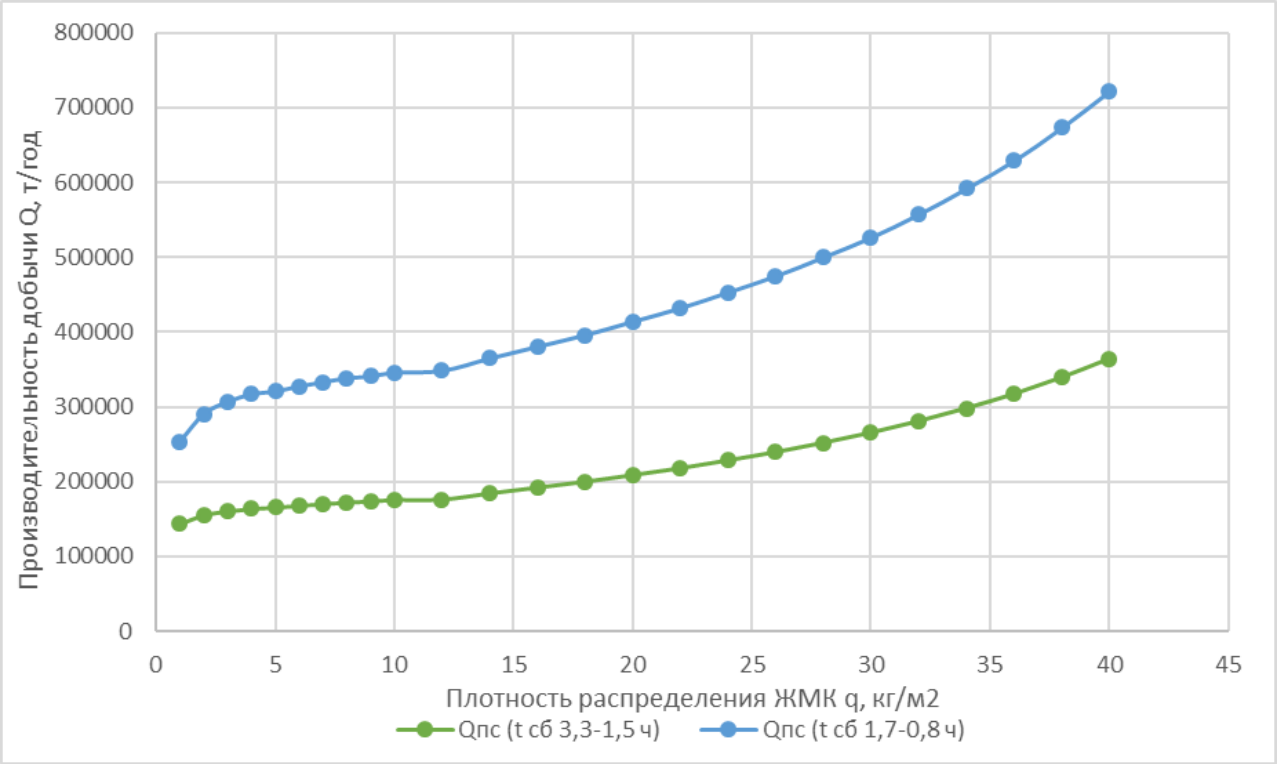


Рисунок 4.12 – Производительность добычи комплекса с двумя бункерами, автономной станцией с мини-роботами и передвижным спредером (составлено автором)

В данном случае наибольшую роль по обеспечению производительности играют параметры плотности распределения конкреций и время сбора ЖМК автономными мини-роботами «особями», причём оба критерия – взаимосвязаны. На графике зеленым цветом изображена зависимость с максимально рассчитанными и имеющимися на данный момент параметрами, синим изображена зависимость, где время сбора при помощи автономных мини-роботов уменьшено вдвое. Реализацией по сокращению времени сбора может быть увеличение размера станции с большим количеством сборщиков или размещение на дне станций в двух

экземплярах, а также увеличение скорости перемещения сборщика (на данный момент известно, что скорость мини-робота составляет 1 м/с) и времени захвата ЖМК.

4.5 Выводы по главе 4

1. Определена конструкция добычного комплекса для рассредоточенных по дну ТПИ.

2. Определена возможная концепция подъема для увеличения производительности при помощи двухскиповой реверсивной подъемной установки для глубоководной добычи твердых полезных ископаемых.

3. Параметры опытного образца комплекса для глубоководной добычи полезных ископаемых позволяют определить цикл добычи одного участка ЖМК и масштабировать расчет до годовой производительности с учетом использования предлагаемого способа смены участка при следующий критериях: малой плотности залегания конкреций < 10 кг/м^2, скорости подъема = 1 м/с, глубины залегания ЖМК – 5000 метров и скорости передвижения спредера – 0,2 м/с.

4. Проведен анализ входных данных комплекса и выполнен расчет производительности добычного комплекса по рекомендуемым условиям в целях повышения эффективности добычи. Предлагается использовать следующую компоновку устройств: два бункера для сбора ЖМК, передвижной спредер для смены участка при частичном заполнении бункера без предварительного подъема, разгрузки и опускания, одна или две автономных станции с роботами-сборщиками «РОЙ».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для решения проблемы повышения производительности добычного комплекса железомарганцевых конкреций при использовании канатной системы для спускоподъемных операций и вспомогательного оборудования для смены участка добычи путем местной транспортировки груза и добычной станции.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа известных концепций и методик расчета зарубежных и отечественных фирм по созданию добычных морских комплексов по сбору ЖМК разработаны и запатентованы конструкции, включающие судно, тросовую систему подъема, автономную станцию со сборщиками мини-роботами и придонный портал, перемещающийся с помощью лап-манипуляторов.

2. Разработанный алгоритм шагания ПС с 6-ю лапами-манипуляторами способствовал достижению минимального времени цикла шагания – 10,07 секунд при использовании в конструкции ПС элементов с сечениями, имеющими коэффициент гидродинамического сопротивления – 0,45.

3. Выполненный сравнительный анализ в виде круговых диаграмм, позволил определить перспективность использования различных типов подъемных устройств и придонных сборщиков, отобранных на основе сравнения аналогов. При этом установлено, что канатный подъем и перемещение придонных аппаратов с помощью лап-манипуляторов превосходит аналоги.

4. Выполненные расчеты и подбор оборудования позволили разработать конструкцию винтового движителя рамы-портала для позиционирования опускаемого/поднимаемого бункера с упором винта 565 Н.

5. Динамический расчет кабель-троса позволил определить тип каната и его предельные значения, так основа кабель-троса должна изготовляться из арамида, диаметр кабель-троса - до 0,06 м с предельным разрывным усилием 2000 кН для максимально поднимаемого веса – 1000 кН.

6. Для проверки теоретических исследований разработан экспериментальный стенд, полученные результаты исследования коэффициента гидродинамического сопротивления позволяют определить приемлемую конструкцию лап-манипуляторов опытного образца ПС – эллипсоидного сечения с отверстиями.

7. Результаты исследований приняты к внедрению в ООО «ГИКО», акт внедрения - 05.06 2025, к внедрению приняты: конструкция комплекса, согласно патенту, параметры бункера, кабель-троса и методика расчета производительности.

8. Дальнейшим развитием исследований по теме диссертации является применение полученных результатов при разработке опытного образца добычного комплекса, проектировании устройств перемещения бункеров и установок с ходовой частью в виде рукоятей-манипуляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев, Н.А., Акопов, С.Г., Джангиров, В.А., Шулико, В.П. Гидроподъем полезных ископаемых со дна морей и океанов посредствам корпусносекционных турбомашин. - Мариуполь: НТБ ПГТУ, Теория и практика металлургии, № 5-6, 2009.

2. Александров, М.Н. Судовые устройства. - Л.: Судостроение, 1987. – с. 656.

3. Андреев, С.И. Экономические и геополитические проблемы освоения минеральных ресурсов Мирового океана / С.И. Андреев, Р.В. Голева, В.М. Юбко // Минеральные ресурсы России. № 3, 2006.

4. Андреев, С.И. Минеральные ресурсы Мирового океана: концепция изучения и освоения (на период до 2020 г.). СПб.: ВНИИОкеангеология, 2007.

5. Ануфриев, Г.С. Космическая пыль в океане / Г.С. Ануфриев, Б.С. Болтенков // Природа. 2000. №3. с. 21-28.

6. Баладинский, В.Л., Лобанов, В.А., Галанов, Б.А. Машины и механизмы для подводных работ. - Л.: Судостроение, 1979. – 192 с.

7. Батурин, Г.Н. Рудный потенциал океана // Природа № 5 2002.

8. Батурин, Г.Н. Руды океана. М., Наука, 1993. – 303 с.

9. Боженов, Ю.А., Борков, А.П., Гаврилов, В.М. Самоходные необитаемые подводные аппараты. - Л.: Судостроение, 1986. – 264 с.

10. Бреслав, Л.Б. Технико-экономические обоснования средств освоения Мирового океана. - Л.: Судостроение, 1982. – 240 с.

11. Гурвич, Е.Г. Металлоносные осадки Мирового океана. М., 1998. – 337 с.

12. Гурин, М.А. Динамические характеристики мерзлого грунта при разрушении его виброударным забойным инструментом // Изв. АН СССР, сер. Мех. – 1955. – с. 36-38.

13. Голева, Р.В. К проблеме изучения и освоения минерально-сырьевых ресурсов Мирового океана // Рациональное освоение недр. № 1. 2010. – с. 53-42.

14. Грейнер, Л. Гидродинамика и энергетика подводных аппаратов / Пер. с

англ. - Л.: Судостроение, 1978. – 384 с.

15. Дж. Меро. Минеральные богатства океана. М.: Прогресс, 1969. – 440 с.

16. Дмитриев, А.Н. Проектирование подводных аппаратов. - Л.: Судостроение, 1978. – 234 с.

17. Добрецов, В.Б. Технология добычи железомарганцевых конкреций Балтийского моря с помощью вертикального эрлифтного подъема / В.Б. Добрецов, А.А. Кулешов, В.С. Евдокименко // Горный журнал, №8, 2001. – с.17- 21.

18. Добрецов, В.Б. Освоение минеральных ресурсов шельфа. - Л.: Недра, 1980. – 272 с.

19. Добрецов, В.Б., Рогалев, В.А., Опрышко, Д.С. Мировой океан и континетальные водоемы: минеральные ресурсы, освоение, экология. СПб.: Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы, 2007. – 796 с.

20. Иванов, К.И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых / К.И. Иванов, В.А. Латышев, В.Д. Андреев. -М.: Недра, 1987. – 272 с.

21. Иванова, А.М. Кайнозойский рудогенез в шельфовых областях России / А.М. Иванова, А.Н. Смирнов, В.И. Ушаков. - СПб.: ВНИИОкеангеология, 2005. – 168 с.

22. Иванова, А.М., Смирнова, А.Н., Рогов, В.С. и др. Шельфовые железомарганцевые конкреции - новый вид минерального сырья // Минеральные ресурсы России. № 6, 2006.

23. Кириченко, Е.А., Гоман, О.Г., Кириченко, В.Е., Романюков, А.В. Моделирование динамических процессов в глубоководных пневмогидротранспортных системах. Монография. - Днепропетровск.: изд. НГУ, 2012. – 266 с.

24. Коробков, В.А., Левин, В.С., Лукашков, А.В., Серебреницкий, П.П. Подводная технология. - Л.: Судостроение, 1981. – 240 с.

25. Корсаков, О.Д. Условия образования и закономерности размещения железомарганцевых конкреций Мирового океана. - Л.: Недра, 1987. – 259 с.

26. Кичигин, А.Ф., Игнатов, С.Н., Лазуткин, А.Г., Янцен, И.А. Механическое разрушение горных пород комбинированным способом. М.: Недра, 1972. – 256 с.

27. Лавренко, С.А. Обоснование параметров исполнительных органов комплекса для проведения вспомогательных выработок в условиях кембрийских глин: Автореф. дис. канд. техн. наук / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2014. с. 9-13.

28. Маховиков, Б.С. Анализ работы исполнительного органа машины для добычи конкреций на шельфе. Технология и механизация горных работ., сб. научных трудов. - М.: изд. АГИ, 1998г

29. Маховиков, Б.С. Средства подводной разработки россыпей на шельфе и в глубоководных районах морей и океанов / Б.С. Маховиков, В.И. Александров // Обогащение руд № 2, 2004.

30. Маховиков, Б.С. Горнодобывающий комплекс для морской разработки твердых ПИ / Б.С. Маховиков, М.Л. Кабанов // Горные машины и автоматика. 2003г., № 5., с. 30-32.

31. Медведков, В.И. Повышение энерговооруженности исполнительных органов механогидравлических машин и их производительности на основе водяных двигателей / Научно-Технические разработки ВНИИгидроугля и МГИ. - М.: изд. МГИ, 1989.- 211с. – с. 92-160.

32. Мельников, М.Е. Кобальтоносные марганцевые корки подводных гор океана. Современное состояние проблемы //VII Всероссийское литологическое совещание «Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории», Т. 2, 2013. – с. 264-268.

33. Мельников, М.Е. Возраст и условия формирования кобальтоносных марганцевых корок на гайотах Магеллановых гор / М.Е. Мельников, С.П. Плетнев // Литология и полезные ископаемые. 2013. № 1. с. 3–16.

34. Мельников, М.Е. Биостратиграфические исследования кобальтоносных марганцевых корок на гайотах Магеллановых гор / М.Е.

Мельников, С.П. Плетнев // Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2011, № 3. с. 45–69.

35. Менард, Г.У. Геология дна Тихого океана. М.: МИР, 1966. – 275 с.

36. МИ 2949-05 «ГСИ. Машины универсальные испытательные серий Z; SP фирмы ZWICK GmbH & Co. Методика поверки». – Екатеринбург: ФГУП «УНИИМ», 2005. – 9 с.

37. Некрасов, С.С. Сопротивление хрупких материалов резанию. М., «Машиностроение», 1971. – 182 с.

38. Нурок, Г.А., Бруякин, Ю.В., Бубис, Ю.В. Технология добычи полезных ископаемых со дна озер, морей и океанов. М., 1979. – 381 с.

39. Патент № 2375578 Российская Федерация, МПК E21C 50/02 (2006.01). Способ селективного отбора и предварительного обогащения железомарганцевых конкреций и устройство для его реализации : № 2008121079 : заявлено 26.05.2008 : опубликовано 10.12.2009, Бюл. № 34 / Юнгмейстер Д. А., Смирнов Д.В., Большунов А. В.

40. Патент № 186415 Российская Федерация, МПК E21C 50/02 (2006.01), E02F 3/88 (2006/01). Придонное добычное устройство для сбора железомарганцевых конкреций со дна морей : № 2018124404 : заявлено 03.07.2018 : опубликовано 21.01.2019, Бюл. № 3 / Д. А. Юнгмейстер, А. И. Исаев, С. Л.Сержан.

41. Патент № 193043 Российская Федерация, МПК E21C 50/02 (2006.01), E02F 3/88 (2006/01). Устройство для сбора железомарганцевых конкреций со дна морей : № 2019124412 : заявлено 29.07.2019 : опубликовано 11.10.2019, Бюл. № 29 / Юнгмейстер Д. А., Исаев А. И., Сержан С. Л., Королев Р. И., Бородкин Э. О.

42. Патент № 178978 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01), E02F 3/88 (2006/01). Придонное добычное устройство для сбора железомарганцевых конкреций со дна морей : № 2017137049 : заявлено 20.10.2017 : опубликовано 24.04.2018, Бюл. № 12 / Юнгмейстер Д. А., Киреев К. А. Наумова П. Д., Бородкин Э. О.

43. Патент № 203596 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01), E02F 3/413 (2006/01). Устройство для сбора кобальтомарганцевых корок со дна

морей : № 2021103823 : заявлено 16.02.2021 : опубликовано 13.04.2021, Бюл. № 11 / Юнгмейстер Д. А., Королев Р. И., Сержан С. Л., Уразбахтин Р. Ю.

44. Патент № 2720041 Российская Федерация, МПК E21B 4/06 (2006.01), E21C 37/00 (2006/01). Устройство для разрушения горных пород ударными импульсами : № 2019111583 : заявлено 16.04.2019 : опубликовано 23.04.2020, Бюл. № 12 / Юнгмейстер Д. А., Королев Р. И., Исаев А. И., Соболева П. Д.

45. Патент № 2659045 Российская Федерация, МПК E21B 6/00 (2006.01). Перфоратор : № 2017120631 : заявлено 13.06.2017 : опубликовано 27.06.2018, Бюл. № 18 / Юнгмейстер Д. А., Королев Р. И., Наумова П. Д.

46. Патент № 2517288 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01), E02F 3/88 (2006/01). Грунтозаборное устройство : № 2012150878 : заявлено 27.11.2012 : опубликовано 27.05.2012, Бюл. № 15/ Александров В.И., Медведков В.И., Сержан С. Л.

47. Патент РФ № 2459083 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01). Грунтозаборное устройство : № 2010148363 : заявлено 26.11.2010 : опубликовано 26.11.2010, Бюл. № 23 / Медведков В. И., Незаметдинов А. Б., Кондаков Д. Ю., Сержан С. Л.

48. Патент № 2562304 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01). Способ добычи железомарганцевых конкреций из илистых донных отложений и устройство для его осуществления : № 2014148096 : заявлено 28.11.2014 : опубликовано 10.09.2015, Бюл. № 25 / Кириченко Ю.В., Каширский А.С., Иващенко Г.С., Якупов И.И.

49. Патент № 2405110 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01). Комплекс для добычи железомарганцевых конкреций с шельфовой зоны Мирового океана : № 2009124764 : заявлено 29.06.2009 : опубликовано 27.11.2010, Бюл. № 33 / Тарасов Ю.Д.

50. Патент № 95112283 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01). Устройство для добычи конкреций с морского шельфа : № 95112283 : заявлено 18.07.1995 : опубликовано 20.07.1997 / Тарасов Ю.Д., Тимофеев И.П.

51. Патент № 2466275 Российская Федерация, МПК E21C 50/02 (2006.01).

Комплекс для добычи и обогащения твердых полезных ископаемых : № 2011118253 : заявлено 05.05.2011 : опубликовано 10.11.2012, Бюл. № 31 / Тарасов Ю.Д., Тимофеев И.П., Большунов А.В., Морус В. И., Королев И. А.

52. Патент № 2150004 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2000.01). Самоходная тележка для сбора конкреций в условиях дна Мирового океана : № 99104941 : заявлено 09.03.1999 : опубликовано 27.05.2000, Бюл. № 15 / Маховиков Б.С., Кабанов О.В., Шорников В.В., Шмидт В.Э.

53. Патент № 2203421 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2000.01). Установка для добычи полезных ископаемых со дна акватории : № 2001127590 : заявлено 10.10.2001 : опубликовано 27.04.2003, Бюл. № 12 / Маховиков Б. С., Шорников В. В., Незаметдинов А. Б., Шалыгин А. В.

54. Патент № 2426883 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01). Устройство для подводной разработки месторождений полезных ископаемых : № 2010110186 : заявлено 17.03.2010 : опубликовано 20.08.2011, Бюл. № 23 / Кисляков В. Е., Катышев П. В., Бурояков А. Ю.

55. Патент № 2214510 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2000.01). Глубоководный добычной комплекс и телеуправляемый подводный робот : № 2002130516 : заявлено 14.11.2002 : опубликовано 14.10.2003, Бюл. № 29 / Шестаченко Ф. А., Маракуца Г. С., Тетюхин В. В., Львович Ю. А., Ястребов В. С., Човушян Э. О., Терехов А. Н., Каплун Ф. В., Хервиг Кнут.

56. Патент № 2737944 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01). Устройство для сбора полиметаллических конкреций : № 2020101260 : заявлено 10.01.2020 : опубликовано 07.12.2020, Бюл. № 34 / Волков В. А., Шумский В. В., Жигалов В. И.

57. Патент № 130344 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2006.01). Добывающий агрегат для комплекса глубоководного сбора твердых полезных ископаемых : № 2012158035 : заявлено 28.12.2012 : опубликовано 20.07.2013, Бюл. № 20 / Быстров Е. О., Вершинский А. В., Ганкевич Д. Я., Гнездилов С. Г.

58. Патент № 2788227 C1 Российская Федерация, МПК E21C 50/00, B63B 35/00, E02F 7/00. Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну

полезных ископаемых : № 2022123385 : заявл. 01.09.2022 : опубл. 17.01.2023 / Д. А. Юнгмейстер, В. А. Шпенст, А. В. Григорчук А. И. Исаев, **М. П. Смоленский**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

59. Петухов, С. И. Отчет о разработках добычных комплексов глубоководных твердых полезных ископаемых за 2022 год. – ФГБУ «ВНИИОкеангеология», 2022. – 30 с.

60. Письменный, Д.Т. Конспект лекций по теории вероятностей, математической статистике и случайным процессам - М.: Айрис- пресс, 2007. – 288 с.

61. Плотников, В.П. Определение основных параметров корончатых исполнительных органов комбайнов с гидроприводом для добычи крупного угля. Горный информационно-аналитический бюллетень № 2. 2006. – с. 71-75.

62. Подэрни, Р.Ю. Механическое оборудование карьеров / Р.Ю. Подэрни - М : Изд-во Моск. гос. горн. ун-та (МГГУ). 2007. – 680 с

63. Покровский, И.С. Теория ударного бурения / И.С. Покровский // Горный журнал. – 1949. - № 12. – с. 17-26.

64. Протасов, Ю. И. Теоретические основы механического разрушения горных пород. М.: Недра, 1985. – 242 с.

65. Протодьяконов, М.М. Методика рационального планирования экспериментов / М.М. Протодьяконов, Р.И. Тедер - М.: Наука, 1970. – 76 с.

66. Заявка на регистрацию патента на изобретение № 2024131950 «Подъемная установка для глубоководной добычи твердых полезных ископаемых» от 24.10.2024 / Д. А. Юнгмейстер, С. Л. Сержан, М. П. Смоленский, Ю. К. Выболдин; заявитель Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

67. Родин, Р. А. О механизме роста трещины при разрушении упруго-хрупкого тела // Горный журнал. Изв. ВУЗов. -1991. - № 10. – с. 5-12.

68. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

69. Рукодельцев, А.С. Определение эффективности применения вибрационного грейфера с аккумулятором энергии для перегрузки сыпучих материалов при отрицательных температурах: Автореф. дис. канд. техн. наук / Волжская государственная академия водного транспорта. Нижний Новгород, 2002.

70. РТМ 212.0133-85. Грейферы двухчелюстные канатные общего назначения для портовых кранов. Методы расчета при проектировании. – Введ. 01.06.85 – Горький, 195. – 55 с.

71. Савенко, В.С. Физико-химический анализ процессов формирования железомарганцевых конкреций в океане. М.: ГЕОС, 2004. – 156 с.

72. Севастьянов, В.А. Разработка методики расчета и создание рациональной конструкции канатного грейфера-рыхлителя для смерзшихся сыпучих материалов: Автореф. дис. канд. техн. наук / Волжская государственная академия водного транспорта. Нижний Новгород, 2006.

73. Сержан, С.Л. Особенности энергообеспечения грунтозаборного устройства добычного комплекса для подводной добычи / С.Л. Сержан, В.И. Медведков // Горное оборудование и электромеханика № 10. 2014. – с. 23-29.

74. Сержан С.Л. Оснащение грунтозаборного устройства рабочим органом с объемным гидродвигателем // Горное оборудование и электромеханика № 10. 2013. – с. 39-42.

75. Перспективы применения добычного комплекса с капсулой в условиях добычи шельфовых железомарганцевых конкреций Российской Федерации / С. Л. Сержан, Д. В. Малеванный, Е. В. Федоров, Л. М. Дадаян // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 4(162). – С. 3-11. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-4-3-11. – EDN IIWRRI.

76. Сержан, С. Л. Технология глубоководной добычи твердых полезных ископаемых с применением промежуточной капсулы / С. Л. Сержан, Д. В. Малеванный // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 2(166). – С. 49-56. – DOI 10.26730/1816-4528-2023-2-49-56. – EDN HWKPMS.

77. Сержан, С. Л. Современное состояние и перспективы развития технологий подъема для комплексов добычи глубоководных твердых полезных

ископаемых / С. Л. Сержан, Д. В. Малеванный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 12-1. – С. 107-128. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_121_0_107. – EDN EPCPCP.

78. Ставрогин, А. Н., Протосеня, А. Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра, 1992. – 224 с.

79. Суриков, В.В. Механика разрушения мерзлых грунтов. – Л.: Стройиздат, 1979. – 127 с.

80. Сысоев, Н.И. Моделирование процесса внедрения клиньев разной формы в породный массив при осевой и винтовой схемах ударного нагружения / Н.И. Сысоев, А.А. Гринько, Д.А. Гринько // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). 2021. – № 6. – с. 120–132.

81. Сысоев, Н.И. Математическое моделирование влияния угла приложения ударной нагрузки при бурении горной породы на эффективность сколообразования / Н.И. Сысоев, А.А. Гринько, Д.А. Гринько // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. ISBN 2072 – 6554. 2019 (№ 463 из перечня Минобрнауки России по состоянию на 12.07.2021 г.).

82. Тарасов, Ю.Д. Транспортные машины непрерывного действия. СПГГИ(ТУ), СПб, 2009. – 144 с.

83. Таубер, Б.А. Грейферные механизмы. -М.: Машиностроение, 1967. – 424 с.

84. Тимофеев, И.П. Шагающие машины для освоения ресурсов морского дна. - Л. ЛГИ. 1987. – 176 с.

85. Ушаков, Л. С. Гидравлические машины ударного действия / Л.С. Ушаков, Ю.Е. Котылев, В.А. Кравченко. – М: Машиностроение, 2000. – 416 с.

86. Царицин, В.В. Технологическое разрушение горных пород / В.В. Царицин. – Киев: Техника, 1964. – 443 с.

87. Шалыгин, А.В. Обоснование параметров подводной машины для добычи твердых полезных ископаемых с поверхности морского дна: дис. ... канд. тех. наук : защита 20.06.2007/ Шалыгин Алексей Викторович; - Санкт - Петербург, 2007. - 128с.

88. Юнгмейстер, Д.А. Модернизация гидравлических бурильных головок / Д.А. Юнгмейстер, Р.И. Королев, А.С. Сакерин, В.А. Карлов // Горное оборудование и электромеханика. 2017. – № 4. – с. 8-13.

89. Юнгмейстер, Д.А. Устройство для сбора железомарганцевых конкреций с механизмом шагания / Д.А. Юнгмейстер, Р.И. Королев**,** Э.О. Бородкин // Сборник трудов - Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019», 2019

90. Юнгмейстер, Д.А. Исследование параметров устройства для добычи кобальто-марганцевых корок / Д.А. Юнгмейстер, Р.И. Королев**,** С.Л. Ивановский, Э.О. Бородкин // Сборник трудов - Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020», 2020.

91. Юнгмейстер, Д.А. Комплекс для ведения добычи железомарганцевых конкреций со дна моря / Д.А. Юнгмейстер, Д.В. Смирнов // Горное оборудование и электромеханика, №1, 2008. – с. 49-50.

92. Юнгмейстер, Д.А. Обоснование параметров и компоновок придонных агрегатов для сбора железомарганцевых конкреций / Д.А. Юнгмейстер, Д.В. Смирнов, Г.В. Соколова // Горное оборудование и электромеханика, № 8, 2010.

93. Юнгмейстер, Д.А. Устройство с камерой разрежения для сбора глубоководных железомарганцевых конкреций / Д.А. Юнгмейстер, С.Л. Сержан, Р.И. Королев // Сб. трудов XVII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека». Екатеринбург. 2019. – С. 170-171.

94. Юнгмейстер, Д.А. Обоснование конструкции технических средств для извлечения глубоководных полезных ископаемых / Д.А. Юнгмейстер, Р.И. Королев, Э.О. Бородкин, С.А. Лавренко, А.П. Вержанский, М.Ю. Насонов // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). 2021. – № 1 (S5). – с. 3–13.

95. Юнгмейстер, Д. А. Расчет производительности добычного комплекса ЖМК с применением камер разрежения / Д. А. Юнгмейстер, С. Л. Сержан, **М. П.**

Смоленский // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 15. – С. 171-176. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-171-176. (№ 2337 Перечня ВАК ред. 25.05.2022 г.)

96. Юнгмейстер, Д. А. Расчет скорости движения придонного добычного устройства с шестью конечностями / Д. А. Юнгмейстер, А. И. Исаев, **М. П. Смоленский**, А. В. Беляев // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 18. – С. 121-127. – DOI 10.26160/2658-3305-2023-18-121-127. (№2391 Перечня ВАК ред. 07.12.2022 г.)

97. Юнгмейстер, Д.А. Конструкции и параметры механизмов шагания для комплекса добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых / Д. А. Юнгмейстер, **М. П. Смоленский**, А. И. Исаев, Ф. А. Ефимов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 11-1. – С. 159-174. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_111_0_159.

98. Юнгмейстер, Д.А. Параметры шагающего устройства для добычи полезных ископаемых, рассредоточенных по морскому дну / Д. А. Юнгмейстер, **М. П. Смоленский**, С. Л. Сержан, Р. Ю. Уразбахтин // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16, № 2(60). – С. 487-502. – DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-2-487-502.

99. Юнгмейстер Д.А**.** Оценка современных методов глубоководной добычи полезных / Юнгмейстер Д.А., Смоленский М.П. // Научный потенциал молодежи и технический прогресс: материалы V Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 20 мая 2022 года. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2022. – С. 30-32.

100. Юнгмейстер Д.А. Оценка и сравнение методов транспортировки глубоководных полезных ископаемых / Юнгмейстер Д.А., Смоленский М.П. // XI форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства: Сборник материалов, Минск, 12-16 декабря 2022 г. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2023. – С. 230-232.

101. Юнгмейстер Д.А. Анализ параметров машин комплекса для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых / Юнгмейстер Д.А.,

Смоленский М.П., Исаев А.И., Королев Р.И., Ефимов Ф.А. // Полезные ископаемые Мирового океана: Сборник тезисов докладов 10-й Международной конференции, Санкт-Петербург, 20–22 июня 2023 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга», 2023. – С. 133-136.

102. Юнгмейстер Д.А. Конструктивные особенности органов перемещения сборщиков морских придонных твердых полезных ископаемых / Юнгмейстер Д.А., Смоленский М.П. // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXII международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 162-165.

103. Юнгмейстер Д.А Параметры опытного образца комплекса для добычи рассредоточенных по дну твердых полезных ископаемых / Юнгмейстер Д.А., Смоленский М.П., Сержан С.Л., Ефимов Ф.А. // Конференция «Освоение минеральных ресурсов Мирового океана»: сборник тезисов. Санкт-Петербург, 17–19 июня 2024 года. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2024. — С. 78-80.

104. Atmanand, M.A. Concepts of deep-sea mining technologies / M.A. Atmanand, G.A. Ramadass // Springer International Publishing, 2017. pp. 205-341.

105. Cherkashov, G. Seafloor massive sulfides from the Northern Equatorial Mid-Atlantic Ridge: new discoveries and perspectives / Poroshina I., Stepanova T., Ivanov V., Bel’tenev V., Lazareva L., Rozhdestvenskaya I., Samovarov M., Shilov V., Glasby G.P., Fouquet Y., Kuznetsov V. // Marine Georesources & Geotechnology, 2010, V. 28, pp. 222-239.

106. Development of Mining Element Engineering Test Machine for Operating in Seafloor Hydrothermal Deposits / Ishiguro S., Y. Yamauchi, H. Odaka, S. Akiyama // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2013, Vol.50 No 2, pp. 21-26.

107. Development of the Pilot System for Test of Excavating and Ore lifting of Seafloor Polymetallic Sulfides / S. Ishiguro, M. Masuda, M. Komatsu, N. Yamaji, S. Kawano // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2018, Vol.55 No 3, pp. 1-7.

108. Determination of the rational number of cutters on the outer cutting drums of Geokhod / A. Khoreshok, K. Ananiev, A. Ermakov, D. Kuziev, A. Babarykin // Acta Montanistica Slovaca, 2020, 25(1), pp. 70–80.

109. Gollner S. Resilience of benthic deep-sea fauna to mining activities / S. Gollner, S. Kaiser, L. Menzel, D. O. B. Jones, A. Brown, N. C. Mestre, et al. // Mar. Environ. Res. 129, 2017, pp. 76–101.

110. Iungmeister D.A. Materials of devices and equipment for deep-sea mining of manganese resources / D.A. Iungmeister, R.I. Korolev, S.L. Serzhan, A.I. Isaev, E.O. Borodkin // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1582(1), 012098.

111. Iungmeister, D.A. Improvement of shock system of hydraulic drill to increase drilling intensification / D.A. Iungmeister, R.I. Korolev, V.A. Karlov // IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2018, 194(3):032006.

112. Korshunov, V.A Strength estimation of fractured rock using compression - a specimen with spherical indenters / V.A. Korshunov, D.A. Solomoychenko, A.A. Bazhukov // Geomechanics and Geodynamics of Rock Massesthis link is disabled, 2018, 1, pp. 299–306.

113. Lipton, I. Preliminary Economic Assessment of the Solwara Project, Bismark Sea, PNG – Nautilus Minerals Niugini Ltd / Edward Gleeson, Peter Munro. Report // Technical report compiled under, 2018, p 242.

114. Liu, C. Fe(II)-induced transformation of iron minerals in soil ferromanganese nodules / C. Liu, M.S. Massey, D.E. Latta, Y. Xia, F. Li, T. Gao, J. Hua // Chemical geology, V. 559, 2021, pp. 119901.

115. Morgan Ch. Mining Development Scenario Summary (Cobalt-rich Ferromanganese Crusts deposits) // Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop held in Kingston, Jamaica, 2006, pp. 131-207.

116. Otsuka K. An application of ocean mining technology: deep ocean water utilization / K. Otsuka, K. Ouchi // Springer International Publishing, 2017, pp. 345-361.

117. Pavlovich, A.A. Estimation of rock mass strength in open-pit mining / Pavlovich, A.A., Korshunov, V.A., Bazhukov, A.A., Melnikov, N.Y. // Journal of Mining Institutethis link is disabled, 2019, 239, pp. 502–509

118. Hein J. R., Koschinsky A. Deep-Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules // Treatise on Geochemistry, 2nd ed., 2014, pp. 273—291.

119. Halbach P. E. Marine Co-rich ferromanganese crust deposits: description and formation, occurrences and distribution, estimated World-wide resources / Halbach Peter E. A. Jahn, G. Cherkashov // Springer International Publishing, 2017, pp. 65-138.

120. Satellite tracking reveals novel migratory patterns and the importance of seamounts for endangered South Pacific humpback whales / Garrigue C., Clapham P.J., Geyer Y., Kennedy A.S., Zerbeni A.N. / Royal Society Open Science, 2015.

121. Sharma, R. Deep-Sea Mining: Current Status and Future Considerations // Springer International Publishing, 2017, pp. 1-18.

122. Shulga, N.A. Characteristics of Alkanes in Ferromanganese Nodules of the Clarion–Clipperton Fracture Zone // Oceanology, 2018, V. 58, No. 5, pp. 672–678.

123. Serzhan, S.L. Determining the rational immersion depth of a mining complex capsule for underwater mining of ferromanganese nodules // Procedia Engineering. 2016. V. 150. P. 924-929.

124. Tetsuo, Y. Fundamental geotechnical consideration for design of deep-sea mining systems // Springer International Publishing, 2017, pp. 259-295.

125. Tetsuo, Y. Technological issues associated with commercializing cobalt-rich ferromanganese crusts deposits in the Area // Proceedings of the International Seabed Authority’s Workshop held in Kingston, Jamaica, 2006, pp. 91-101.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2788227

КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОБЫЧИ РАССРЕДОТОЧЕННЫХ ПО МОРСКОМУ ДНУ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич (RU), Шпенст Вадим Анатольевич (RU), Григорчук Артур Владимирович (RU), Исаев Алексей Игоревич (RU), Смоленский Максим Павлович (RU)*

Заявка № **2022123385**
Приоритет изобретения **01 сентября 2022 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **17 января 2023 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **01 сентября 2042 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения

Утверждаю

Генеральный директор
ООО «ГИКО»
_____ Григорчук А.В.
Дата « 5 » июня 2025 г.

АКТ
о использовании результатов кандидатской диссертации
Смоленского Максима Павловича
по научной специальности 2.8.8 «Геотехнология, горные машины»

Рабочая комиссия в составе:
Председатель – Литовко С.С.
Члены комиссии: Афанасьев А.А., Кравец А.Н.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование параметров транспортирующих устройств комплекса для подводной добычи железомарганцевых конкреций», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, приняты к использованию в деятельности ООО «ГИКО» при разработке опытного образца добычного комплекса ЖМК, в том числе:

1. На основе анализа преимуществ известных концепций и методик расчета зарубежных и отечественных фирм по созданию добычных морских комплексов по сбору ЖМК разработаны и запатентованы конструкции, включающие судно, тросовую систему подъема, автономную станцию со сборщиками мини-роботами и придонный портал для смены участка выработки, перемещающийся с помощью лап-манипуляторов.

2. Разработанный алгоритм шагания ПА с 6-ю лапами-манипуляторами способствовал достижению минимального времени цикла шагания - 16,71 секунд при использовании в конструкции ПА элементов с эллипсоидными сечениями, имеющими коэффициент гидродинамического сопротивления – 0,45, полученный экспериментально.

3. Анализ грузоподъемности кабель-троса позволил определить тип каната и его предельные значения, диаметр кабель-троса из арамида - до 0,06 м для максимально поднимаемого веса – 1000 кН.

Председатель комиссии

Зам. генерального директора _____ Литовко С.С.

Члены комиссии:

Главный конструктор _____ Афанасьев А.А.

Ведущий инженер _____ Кравец А.Н.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

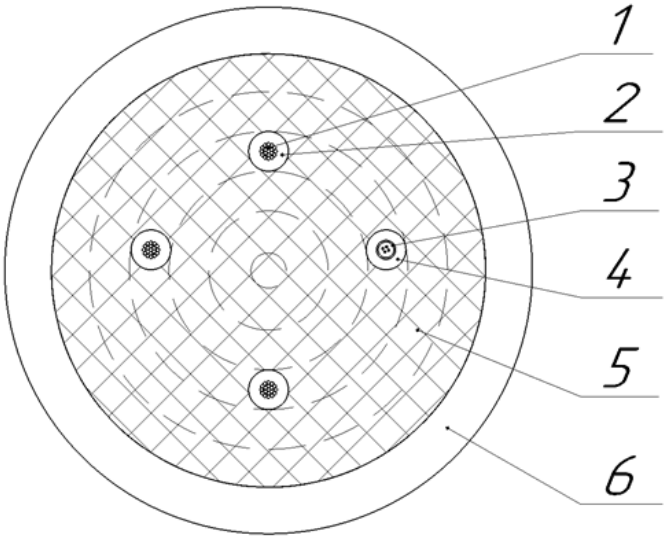
Входные данные для расчетов

Характеристики грузоподъемного устройства

Акционерное общество

ЦЕНТР ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

АО «ЦПТ» ш.Каширское, д.44, к.2,
Москва, 115409;
тел./факс: (499) 323-37-10
ОКПО 42935911 **ОГРН** 1027700343626
ИНН/КПП 7724185856/772401001



КТ 2500 кН

№	Наименование элементов конструкции	Материал элемента конструкции, размеры	Расчетный диаметр, мм
1	Токопроводящая жила (ТПЖ) 3 шт.	Проволока ММ 19х0,38 мм (2,0 мм^2)	1,9
2	Изоляция ТПЖ	Полиэтилен ПНД 271-70К, Δ=1,3 мм	4,5
3	Оптический канал связи (ОКС)	МСО 1,5/1,1-3 (G.657A2)	1,5
4	Оболочка ОКС	Полиэтилен ПНД 271-70К, Δ=1,5 мм	4,5
5	Силовой элемент	Жгут из арамидных нитей 316 текс (5220 шт.)	47,0 ± 0,3
6	Промежуточная оболочка	ТЭП MASFLEX 90409WHT9011, Δ =5 мм	57,0 ± 0,5

Основные характеристики

Оптические характеристики:	
1.Затухание на длине волны 1,55 мкм, не более	0,4 дБ/км
Электрические характеристики:	
1.Эл. сопротивление ТПЖ, не более	9,97 Ом/км
2.Сопротивление изоляции ТПЖ, не менее	5000 МОм*км
3.Рабочее напряжение ТПЖ частоты 50 Гц	2500 В АС
Механические:	
Разрывное усилие, не менее	2500 кН
Максимальная рабочая нагрузка, не более	2000 кН
Максимальная рабочая температура	70 °С
Минимальная рабочая температура	минус 40 °С
Минимальный радиус изгиба	500 мм
Расчетная масса кабеля в воздухе	2600 кг/км
Расчетная плавучесть кабеля в морской воде (при атмосферном давлении)	20 кг/км.

Таблица В.1 – Обработка экспериментальных исследований

Модель без отверстий

							ср.знач
1	F, H	6,5	10,7	6,6	6,7		7,625
	t, c	1,12	0,84	1,03	1		0,9975
2	F, H	4,7	4,4	8	6,8	7,5	6,28
	t, c	1,5	1,2	1	0,8	1	1,1
3	F, H	4,5	6,5	5,4	4,1	3,9	4,88
	t, c	1,35	1	0,78	1,3	1,7	1,226
4	F, H	3,1	3,5	2,9	2,5	3	3
	t, c	1,47	1,41	1,4	1,3	1,5	1,416
5	F, H	9,8	10,3	10,4	11,6	11,2	10,66
	t, c	0,66	0,65	0,5	0,6	0,59	0,6

	t, c	v, м/с	F, H	cx	S, м2	p	cx срзнач
	0	0,00	0,0		0,0372	1025	0,530643547
1	1,416	0,56	3,0	0,492981904	0,0037		
2	1,226	0,65	4,9	0,60115156	отверстия		
3	1,1	0,73	6,3	0,622770784			
4	0,9975	0,80	7,6	0,621797359			
5	0,6	1,33	10,7	0,314516129			

построение разброса

1		2		3		4		5			m1	m2	m3	m4	m5	Y	S2	Сумма S2
3,1	0,56	4,5	0,652528548	4,7	0,727272727	6,5	0,802005013	9,8	1,333333333	1)	3,1	3,5	2,9	2,5	3	3	0,13	8,18
3,5	0,564971751	6,5	0,652528548	4,4	0,727272727	10,7	0,802005013	10,3	1,333333333	2)	4,5	6,5	5,4	4,1	3,9	4,88	1,15	
2,9	0,564971751	5,4	0,652528548	8	0,727272727	6,6	0,802005013	10,4	1,333333333	3)	4,7	4,4	8	6,8	7,5	6,28	2,69	
2,5	0,564971751	4,1	0,652528548	6,8	0,727272727	6,7	0,802005013	11,6	1,333333333	4)	6,5	10,7	6,6	6,7		7,625	4,21	
3	0,564971751	3,9	0,652528548	7,5	0,727272727			11,2	1,333333333									

Модель с отверстиями

							ср.знач
1	F, H	4,7	4,9	4,9	4,5		4,75
	t, c	0,59	0,47	0,5	0,75		0,5775
2	F, H	4	5,4	4,3	2,5		4,05
	t, c	0,85	0,78	0,94	0,88		0,8625
3	F, H	3,4	3,1	2,5	3,5	4,1	3,32
	t, c	0,91	0,94	0,97	1,07	0,75	0,928
4	F, H	2,1	2,3	3,3	2,9	2,2	2,56
	t, c	1,04	1,4	0,75	0,88	1,09	1,032
5	F, H	1,8	1,5	2,5	2,2	2,6	2,12
	t, c	1,62	1,25	1,67	1,56	1,56	1,532

	t, c	v, м/с	F, H	cx	S, м2	p	cxсред
	0	0,00	0		0,0335	1025	0,275905683
1	1,532	0,52	2,12	0,45282953	0,0037		
2	1,032	0,78	2,56	0,248130819	отверстия		
3	0,928	0,86	3,32	0,260204849			
4	0,8625	0,93	4,05	0,274191874			
5	0,5775	1,39	4,75	0,14417134			

построение разброса

1		2		3		4		5			m1	m2	m3	m4	m5	Y	S2	среднее	Сумма S2
1,8	0,522193211	2,1	0,775193798	3,4	0,862068966	4	0,927536232	4,7	1,385281385	1)	1,8	1,5	2,5	2,2	2,6	2,12	0,217	0,868	2,395
1,5	0,52	2,3	0,775193798	2,5	0,862068966	5,4	0,927536232	4,9	1,385281385	2)	2,1	2,3	3,3	2,9	2,2	2,56	0,268	1,072	
2,5	0,522193211	3,3	0,775193798	2,5	0,862068966	4,3	0,927536232	4,5	1,385281385	3)	3,4	2,5	2,5	3,5	4,1	3,2	0,48	1,92	
2,2	0,522193211	2,9	0,775193798	3,5	0,862068966	2,5	0,927536232	4,9	1,385281385	4)	4	5,4	4,3	2,5		4,05	1,43	4,29	
2,6	0,522193211	2,2	0,775193798	4,1	0,862068966		0,927536232		1,385281385										

Таблица В.2 – Исходные характеристики для расчета производительности

tзап бункера	**n*tпередв портала**	**2*tспуск/подъем**	**2*tспуск/подъем**	**t разгрузки**	**k навигац**	**Sучастка,**	**q,**	**M (с участка),**	**N зап. контейнеров**	**n1 (цел)**	**n2 (ост)**	**n**	**n (ст)**	**G**
с	с	с	ч	с		м2	kg/m	кг		с	с			кг
12000	10500	50000	13,88888889	600	0,05	490000	1	490000	5,764705882	5	0,7647	5,76470588	6	85000
11900	11170,21	25000	6,944444444				2	980000	11,52941176	11	0,5294	11,5294118	12	
11800	3500	16666,6667	4,62962963				3	1470000	17,29411765	17	0,2941	17,2941176	18	
11700	2625	12500	3,472222222				4	1960000	23,05882353	23	0,0588	23,0588235	24	
11600	2100	10000	2,777777778				5	2450000	28,82352941	28	0,8235	28,8235294	29	
11500	1750	8333,33333	2,314814815				6	2940000	34,58823529	34	0,5882	34,5882353	35	
11400	1500	7142,85714	1,984126984				7	3430000	40,35294118	40	0,3529	40,3529412	41	
11300	1312,5	6250	1,736111111				8	3920000	46,11764706	46	0,1176	46,1176471	47	
11200	1166,667	5555,55556	1,543209877				9	4410000	51,88235294	51	0,8824	51,8823529	52	
11100	1050	5000	1,388888889				10	4900000	57,64705882	57	0,6471	57,6470588	58	
11100	954,5455	4545,45455	1,262626263				12	5880000	69,17647059	69	0,1765	69,1764706	70	
10600	875	4166,66667	1,157407407				14	6860000	80,70588235	80	0,7059	80,7058824	81	
10200	807,6923	3846,15385	1,068376068				16	7840000	92,23529412	92	0,2353	92,2352941	93	
9800	750	3571,42857	0,992063492				18	8820000	103,7647059	103	0,7647	103,764706	104	
9400	**700**	3333,33333	0,925925926				20	9800000	115,2941176	115	0,2941	115,294118	116	
9000		3125					22	10780000	126,8235294	126	0,8235	126,823529	127	
8600							24	11760000	138,3529412	138	0,3529	138,352941	139	
8200							26	12740000	149,8823529	149	0,8824	149,882353	150	
7800							28	13720000	161,4117647	161	0,4118	161,411765	162	
7400							30	14700000	172,9411765	172	0,9412	172,941176	173	
7000							32	15680000	184,4705882	184	0,4706	184,470588	185	
6600							34	16660000	196	196	0	196	196	
6200							36	17640000	207,5294118	207	0,5294	207,529412	208	
5800							38	18620000	219,0588235	219	0,0588	219,058824	220	
5400							40	19600000	230,5882353	230	0,5882	230,588235	231	

Таблица В.3 - Расчеты производительности для разных условий

для vканата = 1 м/с				для vканата = 1 м/с					сравнение Qпс при сх = 1,1 и сх = 0,45						БОЛЬШАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ Q		
Тц ст, vconst	Тц пс, vconst	G	t ч/год	Qст (v=const)	Q ПС (v = const)	v Логачев	l	H	Тпс 1	Тпс 2	Qпс1	Qпс2	Q для v кан	Тпс	Тпс	Qпс при 1 бункере	Qпс при 2 бункерах
ч	ч	кг	ч	т/год	т/год	м/с	м	м	ч	ч	т/год	т/год	т/год	ч	ч	т/год	т/год
41,947864	42,6125	85000	6800	79431,9356	81384,57026	0,67	700	2000	42,80798	42,6125	77835,96	81384,57	81384,57	24	13,93423203	141932	248883,4687
80,33806	81,8125			82949,4766	84779,22078			2500	82,00798	81,8125	81260,39	84779,22	84779,22	45	24,14485294	154237	287266,1936
118,39198	120,6625			84431,3939	86223,97182			3000	120,858	120,6625	82708,65	86223,97	86223,97	65	34,18047386	159680	304384,3115
156,10963	159,1625			85375,8999	87156,20828			3500	159,358	159,1625	83635,6	87156,21	87156,21	85	44,04109477	163217	314978,5461
190,39933	190,8375			87500,306	87833,89009			4000	191,033	190,8375	87210,07	87833,89	87833,89	102	52,52116013	165014	319147,558
227,44443	228,666667			87898,3926	88469,38776			4500	228,8621	228,6667	87353,9	88469,39	88469,39	121	62,04636438	167544	326046,5009
264,15326	266,145833			88297,227	89041,409			5000	266,3413	266,1458	87571,84	89041,41	89041,41	140	71,39656863	169806	331920,7135
300,5258	303,275			88697,8741	89575,46781				303,4705	303,275	87837,21	89575,47	89575,47	158	80,57177288	171911	337165,2259
333,47041	333,695833			89927,0186	90070,04882				333,8913	333,6958	89813,66	90070,05	90070,05	173	88,4247549	173375	339904,8155
369,17041	370,154167			90256,4205	90567,66888				370,3496	370,1542	89969,03	90567,67	90567,67	191	97,26454248	175379	344668,2537
443,59688	446,104167			90135,8903	90696,30598				446,2996	446,1042	89590,03	90696,31	90696,31	230	116,4607843	176087	347413,0819
503,16208	503,9125			92709,6892	92908,98718				504,108	503,9125	92535,73	92908,99	92908,99	254	128,6181373	184446	364007,7597
565,14639	567,2625			94333,0802	94760,36227				567,458	567,2625	93948,81	94760,36	94760,36	280	141,5143791	192080	379848,326
621,34884	621,8625			96525,4874	96664,45557				622,058	621,8625	96415,45	96664,46	96664,46	301	152,0675654	199906	395297,9707
677,95277	679,729167			98295,9336	98639,28648				679,9246	679,7292	98010,86	98639,29	98639,29	321	162,2221405	208717	413309,7972
728,77482	729,079167			100585,253	100683,1677				729,2746	729,0792	100516,3	100683,2	100683,2	337	170,1503268	217927	431418,5073
779,99835	781,4625			102523,293	102809,7957				781,658	781,4625	102305,6	102809,8	102809,8	352	177,5632353	228314	452469,7912
825,44002	825,5625			104952,508	105019,305				825,758	825,5625	104912,1	105019,3	105019,3	362	182,8664216	239343	474116,5669
871,28316	872,4625			107078,852	107323,8105				872,658	872,4625	106910,2	107323,8	107323,8	372	187,5376634	251837	499291,7065
911,34443	911,3125			109684,107	109725,2589				911,508	911,3125	109664,4	109725,3	109725,3	377	190,2158497	265298	525687,0033
951,80718	952,729167			112022,69	112235,4639				952,9246	952,7292	111891,3	112235,5	112235,5	381	192,1454248	280656	556505,5743
986,48806	991,345833			114839,707	114276,972				991,5413	991,3458	114254,4	114277	114277	380	191,7125	297842	590926,5176
1021,5704	1022,2625			117419,219	117605,8009				1022,458	1022,263	117317,3	117605,8	117605,8	379	191,3865196	316835	628173,8142
1053,9626	1055,39583			120133,299	120485,5998				1055,591	1055,396	119947,9	120485,6	120485,6	375	189,1744281	338860	672183,8743
1080,5729	1081,0625			123341,983	123506,2728				1081,258	1081,063	123263,8	123506,3	123506,3	367	185,2609477	363637	720702,348