

На правах рукописи

Смоленский Максим Павлович



**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ
КОНКРЕЦИЙ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич

Официальные оппоненты:

Вильмис Александр Леонидович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», кафедра геотехнологических способов и физических процессов горного производства, исполняющий обязанности заведующего кафедрой;

Рахутин Максим Григорьевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС», кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения, профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Защита диссертации состоится **19 сентября 2025 г. в 10:30** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория №3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 18 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Учитывая плотность распределения конкреций на одном квадратном метре, можно утверждать, что с участка 700х700 метров можно поднять до 5880 тонн ЖМК. 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.

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, 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.

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, 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.

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 твердых полезных ископаемых (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.

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).

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 основана 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 условиях залегания; в подготовке публикаций, отражающих основные положения и результаты диссертационной работы.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, 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 (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные

базы данных и системы цитирования (Scopus). Получен патент РФ на изобретение.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ способов и особенностей конструкций устройств для ведения добычи придонных полезных ископаемых. Проведен анализ основных известных концепций добычи ЖМК, включающих придонные аппараты и системы транспортировки на судно. Проведен параметрический анализ придонных аппаратов и сделаны вывод о необходимости применения установок шагающего типа.

Во второй главе представлен анализ способов перемещения подводных аппаратов по дну. Приведено обоснование параметров кабель-троса, используемого для спускоподъемных операций. Представлены методики расчета подруливающих устройств рамы-спредера для точного наведения бункера и вспомогательного оборудования при его размещении на участке добычи. Представлен алгоритм передвижения ПС шагающего типа и методика определения его скорости. По результатам теоретического исследования выполнен анализ производительности добычного комплекса.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований коэффициента гидродинамического сопротивления моделей рычагов-манипуляторов ПС при движении в воде. Сделан вывод о величине необходимого гидравлического коэффициента при расчете усилий на штоке гидроцилиндров ПС. Выполнен прочностной расчет

конструкций шагающего ПС, позволяющий определить опасные сечения, а также снизить металлоемкость конструкции.

В четвертой главе представлены концепции добычи комплексом рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых и скипового подъема добываемых конкреций. Проведен расчет параметров опытного образца – ПС для перемещения оборудования с участка на участок добычи. Выполнен расчет и сравнение производительности комплекса при разных способах смены участка добычи.

Основные результаты работы отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

На рисунке 1 представлен патент № 2788227 – глубоководный комплекс для добычи ЖМК, состоящий из базового судна 1 с тремя лебедками 2 с кабель-тросами 3 для спускоподъемных операций придонного оборудования и их энергообеспечения.

Потребителями электроэнергии выступают рама с ходовым винтом и подруливающими устройствами 4 для спуска на дно платформы 5 с шагающими роботами для откалывания/сбора породы 9, двух бункеров для сбора ЖМК 6 (один – в режиме спускоподъема, второй – для перемещения по дну), бокса-ангара с зарядной станцией 7 для автономных микророботов 8 (рисунок 3б).

В зависимости от плотности распределения и типа ТПИ для этого комплекса возможно множество вариантов реализации (рисунок 2б), однако по согласованию с заказчиками-соавторами предлагается использовать упрощенную компоновку комплекса применительно к ЖМК (рисунок 2б Вар. 1): два бункера для сбора ЖМК 6; шагающий ПС для перестановки бункера 10; бокс-ангар 7 с автономными мини-роботами 8, разрабатываемый ООО «ГИКО».

Принцип работы комплекса заключается в том, что автономные минироботы-сборщики в количестве 512 штук, перемещающиеся при помощи плавников, собирают ЖМК и заполняют бункер. В ситуации, когда на участке сбора плотность распределения ЖМК составляет меньше 10 кг/м^2 , бункер и автономную станцию необходимо будет переместить на следующий участок с помощью шагающего портала. После заполнения бункера ЖМК транспортируются наверх подъемной установкой, где происходит разгрузка ЖМК и спуск пустого бункера на участок сбора.

Поскольку разработкой бокса-ангара с автономными минироботами, именуемой системой «РОЙ», занимается ООО «ГИКО», областью данного исследования является разработка шагающего ПС для перемещения бункера и транспортирующей установки для выполнения спускоподъемных операций.

Для сравнения способов перемещения ПС придонного добычного комплекса по типу ходовой части был введен ряд функций, по которым производилась оценка эффективности ПА. Функции приведены в таблице 1, каждой из которых присвоен номер на векторной диаграмме (рисунок 2а) 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 параметрам 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.

Как показано в таблице 1 и графиках на рисунке 2а приоритет по параметрам «Воздействие на придонную область» выводит на высокие места устройства с манипуляторами и рукоятями (рисунок 1б). В добычном комплексе приняты именно такие средства перемещения, в том числе сборщики с грейферами и ударником для откалывания связанных ЖМК (рисунок 2б Вар 3, 4).

Таблица 1 - Сравнение устройств перемещения придонных агрегатов (приоритет по экологическому воздействию)

Функции	№ функции на диаграмме	Кэф. важности	Устройство с манипуляторами и рукоятями	Шагающий ход с кран-балкой	Гусеничный ход
Возможность установки устройств захвата	Ф1	0,3	1	0,7	1
Высокая скорость передвижения	Ф2	0,7	0,8	0,6	1
Устойчивость	Ф3	0,6	0,9	0,8	0,9
Простота узлов	Ф4	0,5	0,7	0,8	0,6
Воздействие на придонную область	Ф5	1	1	0,5	0,4
Высокая производительность	Ф6	0,8	0,7	0,8	1
Наличие аналогов основных узлов	Ф7	0,4	0,8	0,7	1
Отсутствие замутненности	Ф8	0,9	0,9	0,4	0,3
Суммарная оценка			4,44	3,29	3,71
Оценка по векторной диаграмме			7958	4799	6007

Цикл шагания ПС необходим для определения производительности добычного комплекса. С учетом времени сбора ЖМК и перемещения незаполненного/пустого бункера с участка на участок производительность варьируется. Расчет скорости передвижения ПС определяется суммарным временем работы всех гидроцилиндров, связанных с рычагами-манипуляторами, и

расстоянием, на которое переместится спредер за один цикл шагания при смене положения рычагов.

Требуемое суммарное усилие при вертикальном выдвижении штока гидроцилиндра (позиция 1, рисунок 3а) определяется (1):

$$F_{\text{сум.усил.}}^y = gk(m - \rho V) + F_{\text{сопр}}, \quad (1)$$

где m – сумма веса конкреций и веса бункера, кг; ρ – плотность морской воды, кг/м³; V – объем вытесненной жидкости, м³; k – коэффициент массы спредера (1,25); $F_{\text{сопр}}$ – сила гидродинамического сопротивления при перемещении ПС, Н.

В упрощенном представлении гидродинамическое сопротивление пропорционально квадрату скорости аппарата:

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

где c_x – коэффициент гидродинамического сопротивления; S – миделево сечение модели, м²; ρ – плотность морской воды, кг/м³; v – скорость объекта, м/с.

Для определения силы гидродинамического сопротивления элементов ПС были проведены экспериментальные исследования с различными формами моделей рычагов-манипуляторов. Стенд представляет собой стеклянный резервуар и тензодатчик для передачи информации о сопротивлении через специальный модуль на ноутбук (рисунок 4). Измерения осуществлялись через поступательное перемещение погруженного образца, связанного моделью каната с тензодатчиком.

При экспериментальном исследовании двух образцов эллипсоидного сечения (без отверстий, с отверстиями 7 мм) было выявлено, что у модели рычага с отверстиями максимальный коэффициент гидродинамического сопротивления равен 0,45, в сравнении с другим образцом с коэффициентом 0,62 (рисунок 5).

При установлении коэффициента гидродинамического сопротивления $\sim 0,45$ рассчитано значение минимальной силы тяги ПА. Минимальное количество точек опоры $N = 3$, требуемая минимальная сила давления штока поршня гидроцилиндра подъема $F_{\text{рычаг}}^y$ будет равняться (3):

$$F_{\text{рычаг}}^y = \frac{F_{\text{тяги}}^y}{3}, \quad (3)$$

Требуемое минимальное значение диаметра поршня D и штока d гидроцилиндра определяется соотношениями (4), (5):

$$D = \sqrt{\frac{4F_{\text{рычаг}}^y}{\pi p_{\text{раб}}}} k, \quad (4)$$

где $p_{\text{раб}}$ – давление в гидросистеме, Па; k – коэффициент запаса.

$$d = 0,7D, \quad (5)$$

Объем поршневой полости определяется по формуле (6):

$$V = L\pi R^2, \quad (6)$$

где L – длина хода поршня, R – радиус поршня.

Скорости движения поршня при подаче жидкости в поршневую $v_{\text{п}}$ и штоковую $v_{\text{ш}}$ полости (при учете коэффициента мощности $k_m = 0,85$ и коэффициента потери времени на разгон и торможение $k_t = 0,75$) рассчитываются как (7) и (8):

$$v_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{н}} k_m k_t}{S_{\text{п}}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{н}}$ – подача насоса, м³/с,

$S_{\text{п}}$ – площадь поршня, м².

$$v_{\text{ш}} = \frac{Q_{\text{н}} k_m k_t}{S_{\text{п}} - S_{\text{ш}}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{ш}}$ – площадь штока, м².

Полученная скорость движения поршня гидроцилиндра при подаче жидкости в штоковую или поршневую часть позволяет рассчитать общее время передвижения ПС на 1 метр, то есть определить его скорость. В таблице 2 представлено описание схемы передвижения шагающего ПС и время, затрачиваемое на каждую фазу (рисунок 3а). Таким образом, определены параметры гидроцилиндров и насосов, при эксплуатации которых скорость шагания ПС составляет 0,2 м/с при массе бункера с ЖМК – 95 тонн.

На рисунке 1а позиции 4 обозначена рама с ходовыми винтами для спускоподъемных операций добычного оборудования, в том числе и ПС. В качестве подруливающих устройств для точного позиционирования рамы и оборудования при спуске должны использоваться винтовые движители с гидроэлектроприводом (ГЭП). Требуемые параметры ГЭП: Электродвигатель 380-415В, 25А, 11кВт; Насос Max 150 Бар, 40 л/м.

Таблица 2 - Описание схемы шагания захватного устройства

Поз. 1	Вертикальный подъем рычагов 1 – 6.	$t_1 = \frac{L}{v_{\pi}} = 0,91(\text{с})$
Поз. 2	Подъем, выдвижение, опускание рычагов 6 → подъем рычагов 1, 2, 4.	$t_2 = 3,2(\text{с})$
Поз. 3	Задвигание рычага 6 и выдвижение рычага 3, поворот рычага 5 в направлении движения, выдвижение рычагов 1, 2 в поднятом состоянии.	$t_3 = 1,82(\text{с})$
Поз. 4	Опускание рычагов 1, 2, 4 → подъем рычагов 3, 5, 6.	$t_4 = 1,38(\text{с})$
Поз. 5	Задвигание рычага 1, выдвижение рычага 4, поворот рычага 2 в направлении движения → рычаги 3, 5, 6 принимают положения для следующего движения	$t_5 = 1,82(\text{с})$
Поз. 6	Опускание рычагов 3, 5, 6 → подъем рычагов 1, 2, 4. Повтор цикла движения с позиции 2.	$t_6 = 0,91(\text{с})$
Полный цикл шагания		$t_{\text{шаг}} = \sum_{i=1}^6 t_i = 10,07(\text{с})$

Согласно справочнику Александрова М.Н. «Судовые устройства» при известных величинах мощности привода $N_{\text{в}}$ и целевой скорости v_p перемещения рамы с оборудованием расчет выполняется с определения упора гребного винта T_y и диаметра винта $D_{\text{в}}$ по формулам (9) и (10):

$$T_y = \frac{F_{\text{сопр}}}{1 - t} + Gtg(\alpha) = 565(\text{Н}), \quad (9)$$

где t – коэффициент засасывания (принимается как 0,06), G – вес конструкции, H ; α – угол отклонения груза.

$$D_{\text{в}} = \sqrt[4]{\frac{T_y}{k_p \rho n^2}} = 0,3(\text{м}) \quad (10)$$

где k_p – коэффициент упора (0,35); ρ – плотность воды, кг/м^3 ; n – частота вращения винта, об/с .

По имеющимся параметрам веса конструкции 157 кН, углом отклонения 4 градуса и ограничением по мощности в 5 кВт, расчетный диаметр гребного винта для упора 565 Н и частотой вращения 50 с^{-1} равен 0,3 метра.

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.

В составе комплекса добычи, как уже было сказано ранее, имеется несколько лебедок с кабель-тросами для спуска и подъема основного и вспомогательного оборудования, а также добываемого сырья. В сравнении с гидротранспортом, ввиду сложности изготовления 4-х слойного трубопровода с нулевой плавучестью, большим количеством требуемых промежуточных капсул и большой замутненности при выполнении работ, технология канатного подъема является наиболее реализуемой.

Для подъема бункера, заполненного конкрециями необходимо использовать арамидный кабель – трос. Согласно расчетам, предельное разрывное усилие такого кабель-троса диаметром 0,06 метров будет составлять 2500 кН, максимальная рабочая нагрузка – 2000 кН, масса кабель-троса в воздухе - 2600 кг/км.

Необходимо определить сколько полезной массы руды способен поднять такой канат. Вес полезной руды рассчитывается по формуле (11):

$$F_r = F_{\max} - F_{\text{дин}} - G_{\text{cont}} - F_{\text{гидр}} - G_{\text{кан}} - F_{\text{кан}}, \quad (11)$$

где $F_{\max}$ – максимальная нагрузка на канат, Н; $F_{\text{дин}}$ – динамическая нагрузка силы натяжения, Н; G_{cont} – вес бункера для сбора ЖМК, Н; $F_{\text{гидр}}$ – нагрузка от сопротивления при подъеме, Н; G_t – вес каната, Н; F_k – нагрузка от сопротивления каната, Н.

Максимальную нагрузку на канат можно рассчитать по формуле (12):

$$F_{\max} = \frac{\sigma_b}{k} = \frac{2500 \cdot 10^3}{2} = 1250000(\text{Н}), \quad (12)$$

где σ_b – предельное разрывное усилие, k – коэффициент запаса (равен 2).

Сила сопротивления при подъеме цилиндрического контейнера со сферическим обтекателем при условии подъема со скоростью 3 м/с рассчитывается идентично формуле (2) и составляет 40734 Н.

Сила сопротивления каната при подъеме рассчитывается по формуле (13):

$$F_{\text{кан}} = c_k \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} = 9950(H), \quad (13)$$

где c_k – коэффициент сопротивления каната (0,05), V – объем каната, м^3 .

Для того чтобы определить динамическую нагрузку силы натяжения, необходимо рассчитать максимальное значение динамической силы натяжения при начальной скорости рывка (14):

$$F_{\text{дин}} = \frac{ESv}{a} (b + f\sqrt{\mu}) = 264064(H), \quad (14)$$

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 и f – безразмерные коэффициенты, определяемые величиной μ ; μ – коэффициент относительности масс груза и каната.

Данные позволяют нам рассчитать максимальную полезный вес конкреций 836171 Н. Таким образом, максимальная полезная масса конкреций G , которую необходимо поднять канатом, диаметром 0,06 м, с коэффициентом запаса 2, со скоростью 3 м/с составляет 85 тонн. По известной вместимости бункера может быть рассчитана производительность комплекса (т/год). Расчет производительности при смене добычного участка с помощью ПС представлен (15):

$$Q_{\text{год}}^{\text{ПС}} = \frac{G n_{\text{зап}}}{(n_{\text{зап}} \cdot (t_{\text{сп.}} + t_{\text{сб.}} + t_{\text{п.}} + t_{\text{р.}}) + t_{\text{см2.}}) \cdot k_{\text{нав}}} t_{\text{ч/год}}, \quad (15)$$

где $n_{\text{зап}}$ – количество заполненных бункеров на весь цикл добычи, $t_{\text{сп}}$ – время спуска бункера для сбора ЖМК на участок добычи, ч; $t_{\text{п}}$ – время подъема бункера для сбора ЖМК на судно, ч; $t_{\text{р}}$ – время разгрузки ЖМК на судне, ч; $t_{\text{сб}}$ – время сбора ЖМК автономными мини-роботами, ч; $t_{\text{см2}}$ – время, затрачиваемое на смену участка добычи (без подъема), ч; $k_{\text{нав}}$ – коэффициент наведения, поправочная

величина на позиционирование опускаемого оборудования равная 1,05; $t_{ч/год}$ – рабочие часы в году (6800 часов).

Анализ производительности добычного комплекса от плотности распределения ЖМК, q , показал, что использование ПС для перемещения оборудования по дну предпочтительнее стандартного способа канатного подъема оборудования на судно (рисунок 2б Вар. 2) и смены участка по воде при $q < 10 \text{ кг/м}^2$ (рисунок 6а).

Для плотности распределения ЖМК на участке $q = 10 \text{ кг/м}^2$ количество заполненных бункеров составляет 58. По вышеуказанным значениям построены зависимости годовой производительности комплекса добычи ЖМК от скорости подъема/спуска тросовой установкой и времени цикла этих операций (рисунок 6б).

Целевая производительность 0,5 млн. т/год достигается при подъеме/спуске со скоростью 3 м/с двух бункеров, грузоподъемностью по 85 тонн при использовании ПС для смены участка добычи (рисунок 6в).

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 изготавливаться 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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 10.26160/2658-3305-2022-15-171176.

2. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. 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.

4. 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 10.21177/1998-4502-202416-2-487-502.

Патент:

5. Патент № 2788227 С1 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".

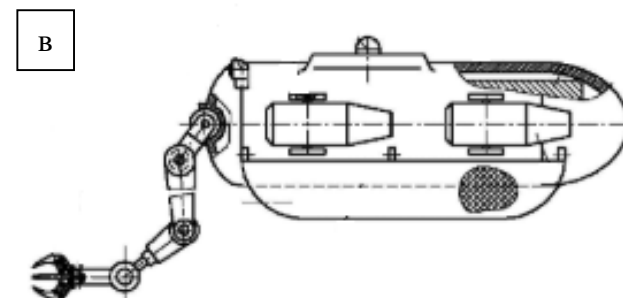
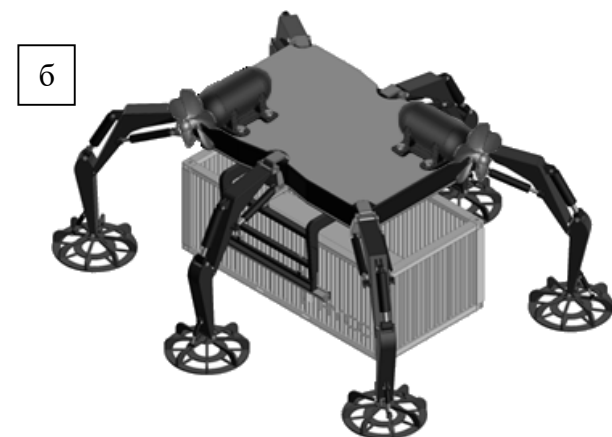
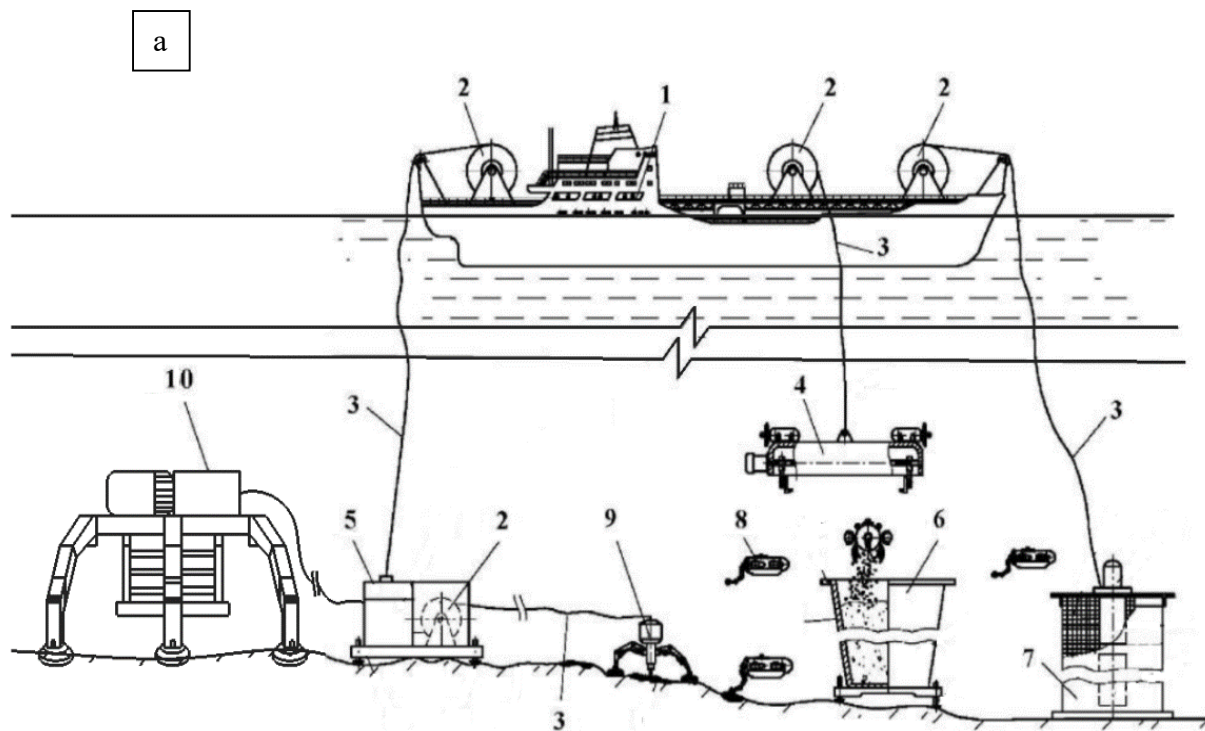
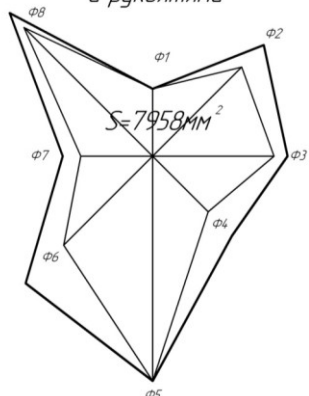
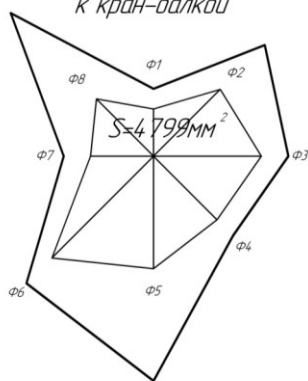


Рисунок 1 – Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых (патент № 2788227) (а) и подводные агрегаты для добычи в составе комплекса: подводный аппарат шагающего типа (б) и автономный миниробот-сборщик с манипулятором (в)

Устройство с манипуляторами и рукоятями



Шагающий ход к кран-балкой



Гусеничный ход

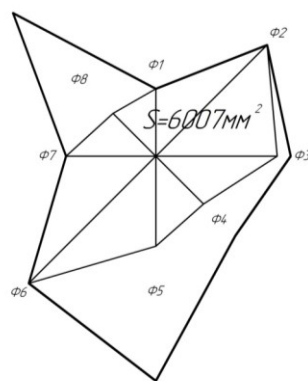


Рисунок 2а - Эффективность использования устройств перемещения по дну добычных машин по фактору «Воздействие на придонную область»

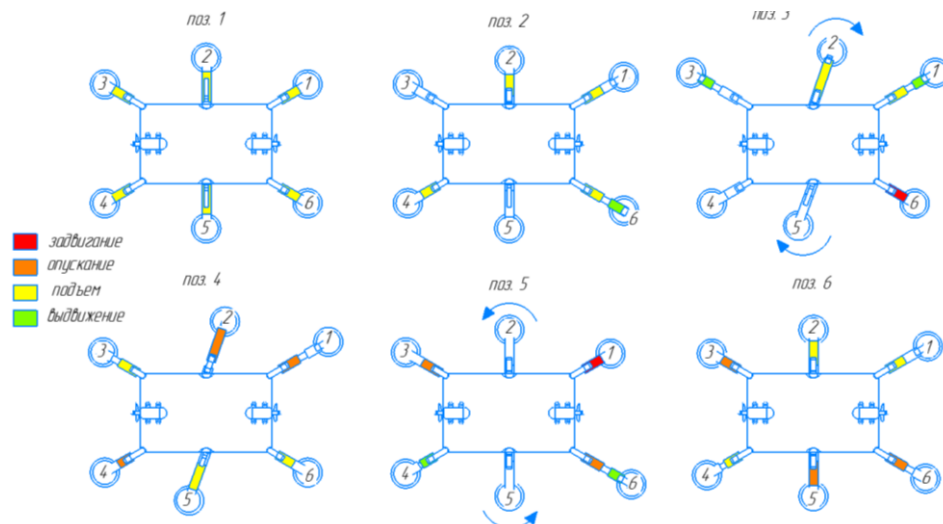
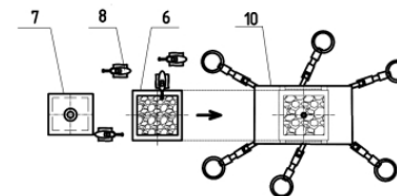
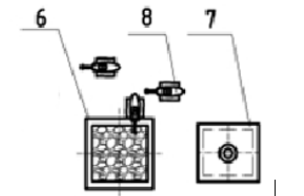


Рисунок 3а - Алгоритм шагания ПА-портала для перемещения бункера

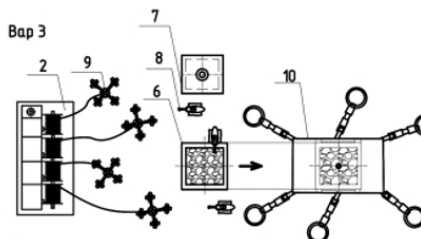
Вар 1



Вар 2



Вар 3



Вар 4

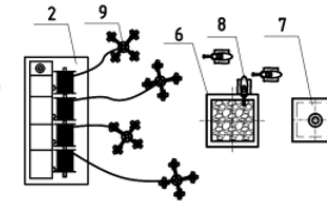


Рисунок 2б - Варианты добычных комплексов в зависимости от плотности распределения ЖМК



Рисунок 3б – Автономный мини-робот сборщик



Рисунок 4 – Экспериментальное исследование гидродинамического сопротивления моделей рычагов-манипуляторов ПС

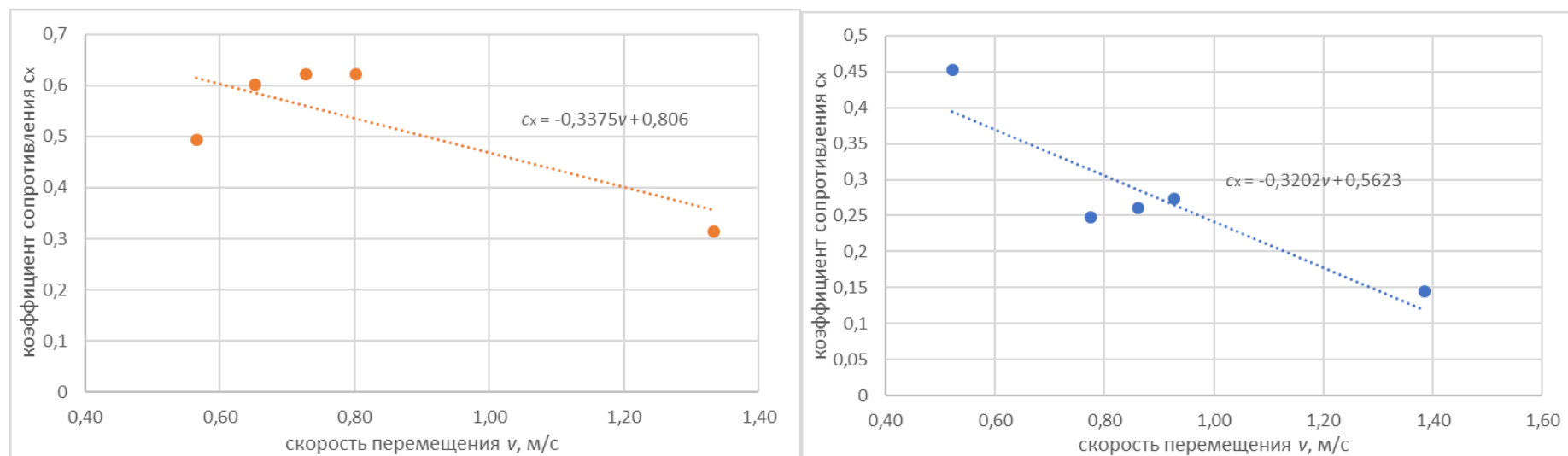
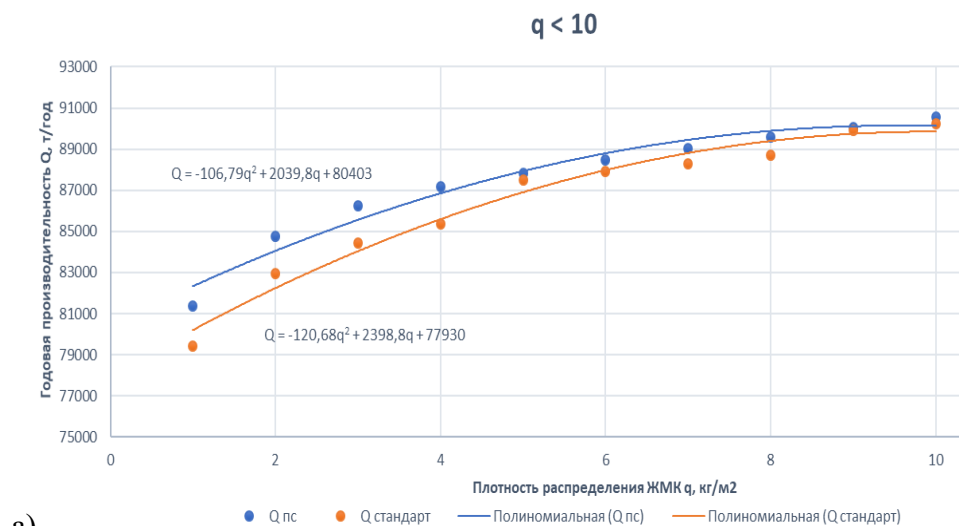
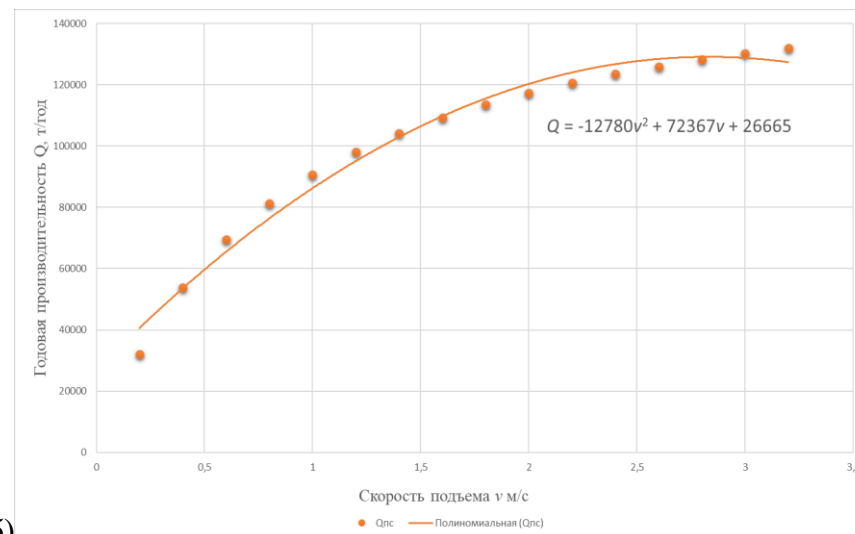


Рисунок 5 – Экспериментальное исследование коэффициента гидродинамического сопротивления образцов а) без отверстий, б) с отверстиями 7 мм



б)



в)

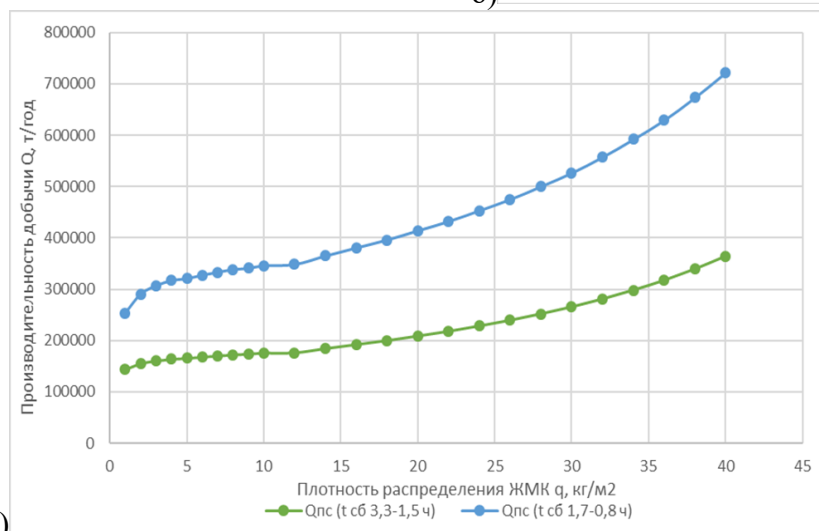


Рисунок 6 – Зависимость годовой производительности: а) от плотности распределения конкреций при различном способе смены участка добычи; б) от скорости спускоподъемных операций (при $q = 10$); в) от плотности распределения ЖМК при использовании двух бункеров