

На правах рукописи

Королев Роман Иванович



**ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР СХЕМНЫХ И
КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ КОБАЛЬТОНОСНЫХ
ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОРОК**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

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

Санкт-Петербург – 2022

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич

Официальные оппоненты:

Вильмис Александр Леонидович

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

Каширский Алексей Сергеевич

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Гормаш Глобал», коммерческий директор.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.

Защита диссертации состоится 24 июня 2022 г. в 12:30 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 22 апреля 2022 г.

УЧЕНЬЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время остро возник вопрос об обеспечении отечественной промышленности кобальтовым и марганцевым сырьем, поскольку основные разрабатываемые источники полиметаллических руд России истощаются. Нехватку полиметаллов, входящих в группу наиболее значимых минеральных ресурсов для экономики страны, согласно стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 г, возможно восполнить запасами твердых полезных ископаемых, залегающих на дне мирового океана, отработке которых посвящены Международные и Национальные проекты.

Однако подводная добыча твердых полезных ископаемых требует разработки новых технологий и оборудования для их реализации. В частности, для осуществления технологии избирательного разрушения и сбора кобальтоносных железомарганцевых корок требуется разработка схемных и конструктивных решений горных машин, например, подводного экскавирующего сборщика, что является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Большой вклад в изучение вопросов, связанных с подводной добычей твердых полезных ископаемых, внесли отечественные и зарубежные ученые: Г. Н. Батулин, Ю. В. Бурякин, Л. Н. Бубис, А. Л. Вильмис, В. И. Вихарев, В. Б. Добрецов, В. А. Рогалев, И. С. Калинин, Н. Г. Малухин, Б. С. Маховиков, В. Т. Медведков, М. Е. Мельников, Дж. Меро, Л. Н. Молочников, Д. А. Мирзоев, Г. А. Нурок, И. П. Тимофеев, Г. А. Черкашев, А. П. Юфин, И. М. Ялтанец, Р. Шарма, Г. Худрас, Р. Вуд, Р. Фальконер, М. А. Атманд, Г. А. Ратмандас и др., в работах которых заложены результаты геолого-разведочных исследований и теоретических изысканий, а также принципы испытаний и эксплуатации оборудования для подводной добычи горных пород дна океана.

Однако обоснование и выбор устройства для добычи кобальтоносных железомарганцевых корок, обеспечивающего внедрение в массив с последующим сбором отколотых от субстрата кусков без дополнительного разубоживания сдерживается отсутствием достаточного объема результатов теоретических и экспериментальных

исследований по выявлению закономерностей процессов разрушения массива корок ковшовым исполнительными органами горных машин с режущими и скалывающими элементами.

Содержание диссертации соответствует пунктам п.4 «Обоснование и выбор конструктивных и схемных решений машин и оборудования во взаимодействии с горнотехническими условиями, эргономическими и экологическими требованиями» области исследований паспорта специальности 05.05.06 – Горные машины.

Цель работы заключается в установлении закономерностей процесса разрушения кобальтоносных железомарганцевых корок ковшовым исполнительным органом со встроенным ударником для разработки научно обоснованного технического решения подводного экскавирующего сборщика в условиях сложного рельефа дна океана, что вносит значительный вклад в развитие горной отрасли страны.

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 ковшовых и ударных механизмов.

2. Провести теоретические исследования по анализу процесса функционирования ковшового исполнительного органа с режущими и скалывающими элементами на основании физико-механических свойств кобальтоносных железомарганцевых корок и возникающих усилий на исполнительном органе.

3. Провести экспериментальные исследования разрушения кобальтоносных железомарганцевых корок резанием и ударом.

4. Выбрать и обосновать схемное и конструктивное решение оборудования для отделения и экскавации кобальтоносных железомарганцевых корок при различных условиях залегания и разработать алгоритм расчета производительности добычного комплекса.

Идея работы заключается в создании импульсного воздействия на ограниченную площадь залегания кобальтоносных железомарганцевых корок для создания трещин разрушения на всю глубину рудного слоя, с последующей экскавацией продуктов

разрушения в приемный бункер сборщика и транспортированием до точки сбора

Научная новизна работы:

1. На основе анализа фактических физико-механических свойств кобальтоносных железомарганцевых корок, позволяющих доказать возможность транспонировать результаты исследований сухих образцов на залежи в реальных горно-геологических условиях, теоретически доказано и экспериментально подтверждено уменьшение удельной силы сопротивления смыканию челюстей грейфера в массиве кобальтоносных железомарганцевых корок толщиной 50...100 мм путем увеличения первоначального внедрения от наложения ударной нагрузки 7...10 Дж.

2. Разработан алгоритм выбора функциональных элементов подводного добычного комплекса для различных условий залегания кобальтоносных железомарганцевых корок, включающий расчет параметров и производительности шагающего сборщика с грейферными исполнительными органами и встроенными ударниками.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны и обоснованы схемные и конструктивные решения подводных сборщиков с грейферными исполнительными органами и встроенными гидроударниками по оси и/или в челюстях грейфера, защищенные патентными свидетельствами, позволяющие извлекать кобальтоносные железомарганцевые корки при минимизации их разубоживания.

2. Результаты диссертационной работы приняты к внедрению обществом с ограниченной ответственностью «Гидравлический комплекс» («ГИКО») – организацией, специализирующейся в разработке аппаратов и устройств для разведки и добычи подводных полезных ископаемых, что подтверждается актом внедрения от 15.02.2022 г.

Методология и методы исследования. Используется комплексный метод исследования, включающий анализ теорий разрушения горных пород ударом и резанием, а также лабораторные исследования разрушения кобальтоносных железомарганцевых корок резанием и ударом с обработкой результатов методами математиче-

ской статистики и проверкой адекватности теоретических положений.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что изменение удельной силы сопротивления смыканию челюстей грейферного исполнительного органа в функции глубины внедрения носит экспоненциальный характер, при этом максимальная величина удельной силы сопротивления в начале смыкания челюстей в массиве корки толщиной 50...100 мм в 1,3 раза меньше после наложения дополнительного ударного импульса 7...10 Дж, а влагонасыщенность кобальтоносных железомарганцевых корок не оказывает существенного влияния на их прочность (в пределах 5 %).

2. Разработанный алгоритм расчета изменения величин основных параметров функциональных элементов подводного добычного комплекса позволил установить экспоненциальную зависимость производительности сбора кобальтоносных железомарганцевых корок сборщика с активными грейферами от их мощности, причем для толщины слоя корок 50...100 мм время цикла исполнительного органа, в зависимости от его конструкции составляет 5...15 с, а теоретическая производительность сбора до 13 т/ч, что требует использование 10 сборщиков, работающих на один бункер, для обеспечения требуемой добычи 1 млн. т/год.

Степень достоверности результатов исследования основана на использовании апробированных математических методов, удовлетворительной сходимости и воспроизводимости результатов лабораторных экспериментов на стендах с применением современных средств измерения и методов исследований

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях: «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME» (г. Санкт-Петербург, 2018, 2019, 2020, 2021); XXI Международные научные чтения имени Игоря Ивановича Сикорского (г. Санкт-Петербург, 2019); XVII Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека» (г. Екатеринбург, 2019).

Личный вклад автора заключается: в постановке цели и задач диссертационного исследования; в анализе зарубежной и отечественной литературы по теме исследования; в анализе параметров горных машин и оборудования, влияющих на применение их как функциональных элементов в составе подводного добычного комплекса; в анализе применимости теорий разрушения горных пород резанием и ударом для кобальтоносных железомарганцевых корок; в получении исходных данных и проведении экспериментов по разрушению кобальтоносных железомарганцевых корок режущими и ударными инструментами; в обработке и интерпретации экспериментальных данных; в обосновании и выборе схемного технического решения подводного оборудования для сбора кобальтоносных железомарганцевых корок при различных условиях залегания, а также разработке алгоритма расчета рейферного исполнительного органа; в подготовке публикаций, отражающих основные положения и результаты диссертационной работы.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 9 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, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 4 патента.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 135 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок и 11 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 представлены: описание горно-геологических условий в разведочных участках, которые закреп-

лены за РФ для добычи кобальтоносных железомарганцевых корок (КМК); анализ конструкций технических средств и комплексов для подводной добычи, существующие на сегодняшний день, которые применялись или планируются к применению, с выделением достоинств и недостатков для добычи КМК; анализ основных методик расчетов процессов разрушения резанием и ударом, с определением применимости к расчету исполнительного органа подводного сборщика; определены цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены результаты исследования физико-механических свойств КМК методом нагружения сферическими инденторами (рисунок 1), на основании которых составлены паспорта прочности КМК при изменении их влагонасыщения, показывающие возможность транспонировать результаты исследований сухих образцов на образцы в реальных горно-геологических условиях.

В качестве исполнительного органа (ИО) подводного сборщика, обосновано использование многочелостного грейферного ковша с клиновой формой режущих элементов (РЭ) и рациональными параметрами: угол заострения и длина режущей кромки.

Приведены результаты анализа усилий, возникающих на РЭ, при различных схемах захвата, в зависимости от условий залегания и прочностных свойств КМК. В случаях, когда КМК представляют собой однородный массив схема работы грейферного ИО будет состоять из двух этапов: начальное внедрение, без смыкания челюстей; смыкание челюстей с увеличением внедрения и прорезыванием слоев КМК.

На основании зависимости силы сопротивления внедрению $F_{вн}$ от удельного сопротивления внедрению и параметров РЭ, с учетом коэффициентов формы РЭ Севастьянова В. А., установлена эмпирическая функциональная зависимость (1) для определения глубины начального внедрения $h_{0вн}$:

$$h_{0вн} = \sqrt[0,54]{\frac{m_{гр} g k_A}{4,73 \sigma_{вн} l t g \beta'}} \quad (1)$$

где $\sigma_{вн}$ – удельное сопротивление внедрению, МПа; l – длина режущей кромки, м; β – угол заострения инструмента, град; $h_{0вн}$ – глубина начального внедрения режущих элементов от усилия подачи

грейфера, м; k_A – коэффициент, учитывающий влияние силы Архимеда, $k_A = 0,87$ для стальных изделий; $m_{гр}$ – масса грейфера, кг.

Определено, что дальнейшее заглубление и прорезание массива КМК, обусловленное смыканием челюстей, будет происходить при условии преодоления удельной силы сопротивления смыканию челюстей, определяемой из выражения (2) для силового расчета грейферного ИО:

$$F_{\text{ч}} = \frac{(m_{\text{гр}} g k_A + \sigma_{\text{сж}} h l \mu) H}{h l}, \quad (2)$$

где $F_{\text{ч}}$ – удельная сила сопротивления смыканию челюсти, Н/м; μ – коэффициент трения инструмента с породой; $\sigma_{\text{сж}}$ – сопротивление материала одноосному сжатию, МПа; h – глубина внедрения, м; H – высота челюсти, м.

Анализ полученной экспоненциальной зависимости удельной силы сопротивления смыканию челюстей от глубины внедрения (рисунок 2) показывает, что максимальное значение удельной силы сопротивления будет в начале процесса смыкания челюстей, а при увеличении глубины внедрения будет уменьшаться, поэтому следует рассматривать способы увеличения начального внедрения.

Если для мягких КМК ($1 \text{ МПа} \leq \sigma_{\text{сж}} \leq 5 \text{ МПа}$) увеличение начального внедрения можно достичь увеличением подачи грейферного ИО, то для более твердых ($5 \text{ МПа} \leq \sigma_{\text{сж}} \leq 15 \text{ МПа}$) целесообразно будет использовать устройства дополнительной интенсификации внедрения, например, встроенного в грейферный ИО гидроударник.

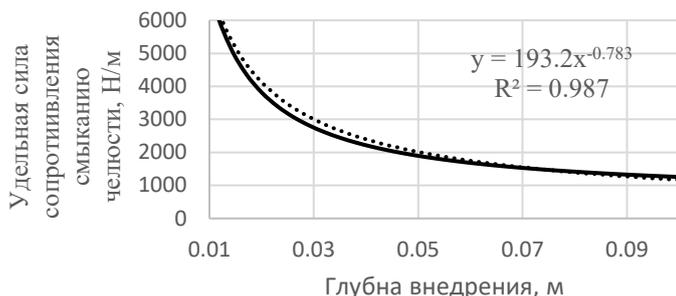


Рисунок 2 – График зависимости удельной силы сопротивления смыканию челюсти от глубины внедрения

С этой целью определены последовательности сбора КМК при использовании схемных решений, в которых гидроударник встраивается по оси ковша (рисунок 3, а) либо в его челюсти (рисунок 3, б).

В первом случае, прирост величины начального внедрения может быть достигнут путем разупрочнения массива и нарушения его сплошности, но это не гарантирует прорезания слоев КМК при смыкании челюстей грейферного ИО для всех условий залегания КМК и их прочностных свойств.

Поэтому, предполагается, что использование встроенных в челюсти грейфера ударников позволит увеличить как глубину начального внедрения, так и интенсифицировать дальнейшее смыкание челюстей с отколом рудной части КМК от субстрата, что значительно уменьшит показатель разубоживания.

Справедливо заключить, что величина начального внедрения будет являться суммой значений начального внедрения от подачи грейфера и глубины внедрения от ударной нагрузки и определяться из выражения (3):

$$h_0 = h_{\text{овн}} + h_{\text{оуд}} = h_{\text{овн}} + \sqrt{\frac{A_{\text{уд}}}{l\sigma_{\text{сж}}(\text{tg}(\beta/2) + \mu)K_{\text{зат}}}}, \quad (3)$$

где $h_{\text{оуд}}$ – глубина начального внедрения от единичного удара (согласно Подэрни Р. Ю.), м; $A_{\text{уд}}$ – энергия удара, Дж, Н/м²; $K_{\text{зат}}$ – коэффициент затупления инструмента.

При дальнейшем смыкании челюстей, скорость их закрытия также будет увеличиваться от наложения ударного импульса через РЭ грейферного ИО, откуда определено выражение (4) скорости смыкания челюстей при использовании встроенных ударников:

$$v_{\text{ч}} = v_{\text{см}} + \frac{A_{\text{уд}}n_{\text{уд}}}{hl\sigma_{\text{сж}}(\text{tg}(\beta/2) + \mu)K_{\text{зат}}}, \quad (4)$$

где $v_{\text{см}}$ – скорость движения челюсти грейфера, обусловленная выдвиганием штоков гидроцилиндров, м/с; $n_{\text{уд}}$ – частота ударов, с⁻¹.

При встраивании гидроударника в челюсти грейфера, важно понимать его габариты, которые во много зависят от параметров поршня-ударника. Для подбора рациональных параметров поршня, зная требуемую энергию удара для эффективного внедрения в КМК,

по основным соотношениям Иванова К. И., определено выражение (5):

$$l_{\text{п}} = \frac{2a^2 A_{\text{уд}}}{E \vartheta_{\text{уд}}^2 S_{\text{п}}}, \quad (5)$$

где $l_{\text{п}}$ – длина поршня-ударника, м; a – скорость прохождения ударного импульса в инструменте, $a \approx 5300$ м/с; $\vartheta_{\text{уд}}$ – ударная скорость поршня, $\vartheta_{\text{уд}} = 5 \div 10$ м/с; E – модуль упругости материала стержней, $E = 21 \cdot 10^{10}$ МПа; $S_{\text{п}}$ – площадь поперечного сечения поршня, м².

Построенные графики зависимости длины поршня ударника от скорости соударения (в пределах 5-10 м/с), при неизменных параметрах его площади сечения и энергии удара (рисунок 4) позволяют определить необходимые размеры поршня для заданной энергии удара.

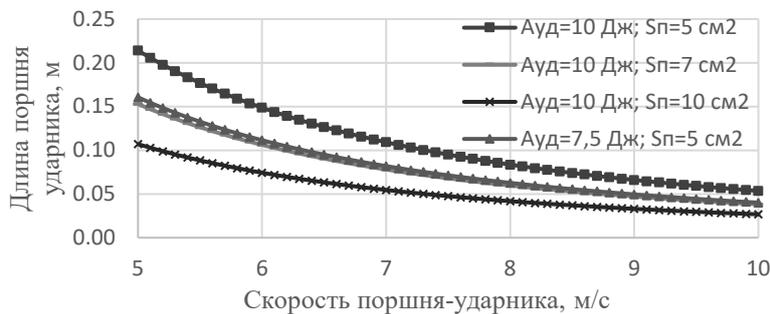


Рисунок 4 – График зависимости длины поршня-ударника от его скорости

Определив параметры элементов ударной системы, требуемое рабочее давление в гидравлическом контуре определялось по уточненному выражению И.А. Бегагона (6):

$$p_0 = \frac{m_1 \vartheta_{\text{уд}}^2}{0,656g S_{\text{п}} S_{\text{г}}}, \quad (6)$$

где p_0 – давление рабочей жидкости, МПа; $S_{\text{г}}$ – ход поршня, м; m_1 – масса поршня, кг; $m_1 = 2A_{\text{уд}}/\vartheta_{\text{уд}}^2$.

Выражение (6) показывает, что для увеличения скорости соударения необходимо увеличить давление в системе, а согласно выражению (5), увеличение скорости позволит уменьшить размеры

поршня-ударника и, соответственно, габариты гидроударника, не изменяя при этом энергию ударного импульса.

Таким образом, основными задачами для экспериментальных исследований являются определение требуемой энергии удара гидроударника и рациональных параметров РЭ грейферного ковша на основании определенной удельной сопротивляемости внедрению $\sigma_{вн}$ в КМК.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса разрушения КМК резанием и ударом, на основании которых определена энергии удара для внедрения в массив КМК, удельное сопротивление внедрению КМК и пределы рациональных параметров режущих элементов грейферного ИО подводного сборщика.

Методика проведения экспериментальных исследований разрушения КМК ударом, используя лабораторный маятниковый копер (рисунок 5, а), включала 4 серии опытов по внедрению ударной пики (рисунок 6, а) в образцы КМК (рисунок 5, б), на основании которых построен график зависимости энергии удара от глубины внедрения пики по различным осям образцов (рисунок 5, в): вдоль слоев КМК и поперек слоев КМК.

Анализ графика (рисунок 5, в) наглядно показывает, что при совершении ударов поперек слоя рудной части, увеличение глубины внедрения с увеличением энергии удара происходит по зависимости, близкой к теоретической (3), что говорит о высокой сходимости экспериментальных данных. При совершении ударов вдоль слоя рудной части и в место соединения КМК с подложкой заглублиение происходило интенсивнее совместно с откалыванием кусков, что подтверждает предположение о повышении интенсификации отделения рудной части при использовании встроенного ударника в процессе смыкания челюстей.

Методика проведения экспериментальных исследований разрушения КМК резанием включала использование испытательной машины Zwick/Roell (рисунок 6, а). Порядок экспериментов включал 4 серии опытов по определению усилий, возникающих на инструменте с различными параметрами длины режущей кромки и угла заострения (рисунок 6, б) при внедрении его вдоль и поперек слоя

рудной части КМК. В результате получены графики зависимости силы внедрения от глубины внедрения в образцы.

При обработке результатов полного факторного эксперимента (ПФЭ) получено уравнение регрессии с адекватными коэффициентами, которое при переводе в натуральную форму представляет собой выражение (7):

$$F_{\text{вн}} = 332,5 - 5692,29l - 7,05\beta - 161,96h_0 + 109,51l\beta + 3896,41lh_0 + 4,23\beta h_0 - 86,56l\beta h_0. \quad (7)$$

По экспериментально полученным данным, построен график зависимости изменения удельного сопротивления внедрению РЭ в КМК от длины режущей кромки (рисунок 7). Анализ которого показывает, что удельное сопротивление внедрению в КМК при увеличении длины режущей кромки убывает по закону степенной функции $y = 0,1024x^{-0,603}$.

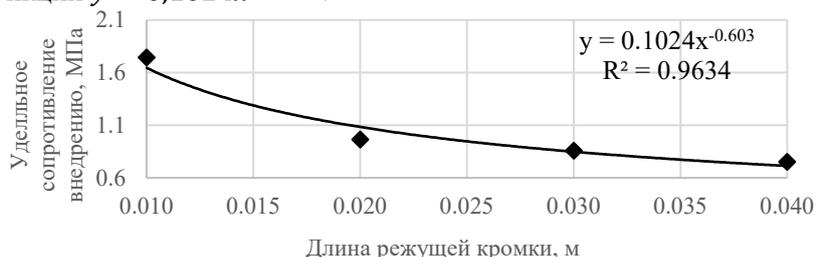


Рисунок 7 – Зависимость удельного сопротивления внедрению ($\sigma_{\text{вн}}$) в КМК от длины l режущей кромки клинового РЭ

Обработка результатов экспериментальных исследований показала, что при вероятности $p=0,95$ разброс значений глубины внедрения и усилия внедрения не превышают допустимого значения доверительного интервала (3-5 %), что означает достаточную воспроизводимость экспериментальных данных.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что при внедрении в КМК толщиной от 50 до 100 мм, с параметрами РЭ рейферного ИО подводного сборщика: $l = 20$ мм; $\beta = 30^\circ$; $\sigma_{\text{вн}} = 1,15$ МПа, величина начального внедрения составит 14,5 мм, а при наложении ударного импульса с энергией удара $A_{\text{уд}} = 7 \div 10$ Дж, заглубление увеличится до 23 мм (в 1,5 раза), при этом удельная сила сопротивления смыканию челюстей $F_{\text{ч}}$ уменьшается с 1035 Н/м до 746 Н/м (в 1,3 раза).

В четвертой главе предложены схемные и конструктивные решения глубоководного комплекса, включающего самоходный сборщик с вариантами исполнительных органов и системой транспортирования для различных условий залегания КМК, а также алгоритм расчета производительности добычного комплекса.

Представлена концепция подводной добычи (рисунок 8) однородных КМК самоходными сборщиками шагающего типа 13 с транспортной системой в виде бадьевого подъема, при котором бадья 7, поднимаемая и опускаемая на тросе специальным приспособлением для захвата 8. Перегрузка из промежуточного бункера сборщика в бадью осуществляется с помощью питателя 6. Количество узлов загрузки (питатель и бадья), а также самих сборщиков может варьироваться и определяется расчетом производительности и запасами месторождения. При реализации устройства предварительного подводного дробления собираемых корок различного размера возможно применение гидротранспортной системы

Подводный сборщик (рисунок 9, а) с грейферными исполнительными органами и встроенными ударниками осуществляет перемещение по рельефу дна на манипуляторах 1, которые приводятся в действие гидроцилиндрами 3 и 4. Опора на почву, закрепление на склонах, а также отделение и экскавация полезного ископаемого в промежуточный бункер 2 осуществляется грейферными исполнительными органами 5, шарнирно закрепленными на манипуляторах с возможностью поворота гидроцилиндрами 6. Встроенные ударники могут быть реализованы в двух исполнениях.

Работа встроенного гидроударника по оси ковша (рисунок 9, б) осуществляется по стандартному принципу: поршень-ударник 7 совершая возвратно-поступательные движения путем создания в полостях 9 и 11 рабочего давления ударяет по инструменту 8 и передает ударный импульс на массив разрушения. Закрытие челюстей грейфера 12 осуществляется гидроцилиндрами 10 и может происходить как одновременно с работой ударника, так и после разрыхления массива КМК.

Встроенные ударники 13 в челюсти ковша (рисунок 9, в) также работают стандартным способом, за исключением того, что

рабочим инструментом в данном случае являются режущие элементы 14 грейфера, а корпусом ударника – его челюсти.

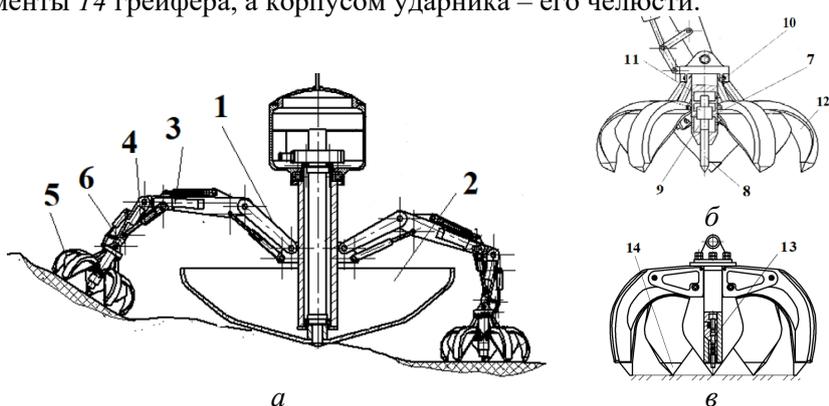


Рисунок 9 – а – конструкция подводного грейферного сборщика; б – конструкция грейфера с встроенным ударником по оси ковша; в – конструкция грейфера с встроенными ударниками в челюстях ковша.

Для оценки предлагаемых конструктивных решений разработан алгоритм в виде блок-схемы, представленный на рисунке 10, включающий выбор типа сборщиков в зависимости от условий залегания КМК и системы подъема из условия рудоподготовки, а также расчет производительности добычного комплекса, проводимый по следующей последовательности.

1) Определение оптимального объема ковша.

С точки зрения эффективности сбора, необходимо за один цикл черпания отрабатывать КМК на всю мощность рудного слоя и обеспечивать максимальное заполнение ковша. Из этого следует, что объем грейферного ковша напрямую будет зависеть от мощности КМК. Предположив, что собираемый материал представляет собой разрыхленный массив, объем скола будет иметь форму эллипсоида с малой полуосью равной мощности КМК h_k и большой полуосью равной половине ширины захвата грейфера B . Так как КМК представляют в основном однородный массив, максимальный объем скола может иметь форму не эллипсоида, а описывающего его цилиндра, объем которого должен быть не больше объема грейфера и определяется по известной формуле (8):

$$V_{\text{ск}} = \frac{\pi B^2}{4} h_{\text{к}} \approx V_{\text{гр}}, \quad (8)$$

где $V_{\text{гр}}$ – объем грейферного ковша, м^3 ; B – ширина захвата грейфера, $B = h_{\text{к}}/0,26$, м.

2) Определение объема промежуточного бункера.

Объем промежуточного бункера $V_{\text{б}}$ выбирается в зависимости от определенного объема грейфера по графику на рисунке 11.

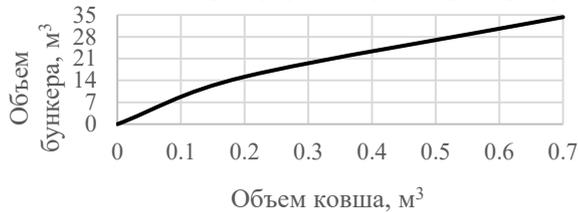


Рисунок 11 – График зависимости объема бункера от объема ковша

3) Определение времени цикла сбора по формуле (9):

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6, \quad (9)$$

где t_1 – время внедрения ковша, $t_1 = 0,2$ с; t_2 – время смыкания челюстей, с; t_3 – время подъема ковша, $t_3 = H_1/\vartheta_{\text{п}}$, с; t_4 – время опорожнения ковша, $t_4 = 2$ с; t_5 – время на поворот манипулятора и другие операции позиционирования ковша перед опусканием, $t_5 = 5$ с; t_6 – время опускания ковша, $t_6 = t_3$, с; H_1 – высота от почвы до высоты разгрузки ковша, равная высоте бункера; $\vartheta_{\text{п}}$ – скорость подачи ковша, м/с.

Время смыкания челюстей определяется по формуле (10):

$$t_2 = \frac{L}{\vartheta_{\text{ч}}} = L / \left(\vartheta_{\text{см}} + \frac{A_{\text{уд}} n_{\text{уд}}}{hl\sigma_{\text{сж}} (tg(\beta/2) + \mu) K_{\text{зат}}} \right), \quad (10)$$

где L – путь, пройденный челюстью при смыкании, м.

4) Теоретическая производительность грейферного исполнительного органа определяется по выражению (11):

$$Q_{\text{теор}} = \frac{3600 V_{\text{гр}} K_3}{T_{\text{ц}} K_y}, \quad (11)$$

где K_y – приведенный коэффициент корректировки, учитывающий замедление движений в воде, $K_y = 1,5$; K_3 – коэффициент заполнения грейфера.

Так, например, при толщине КМК – 50...100 мм, требуемый объем ковша составит до 0,05 м³, а время цикла сбора 5...15 с, откуда теоретическая производительность грейферного исполнительного органа составит 6,5 м³/ч.

5) Определение расчетной часовой производительности.

Производительность сбора одного сборщика с грейферными исполнительными органами и встроенными ударниками в челюсти определяется по формуле (12):

$$Q_{\text{расч}} = \frac{3600\rho_k V_6}{(T_{\text{ц}}n + T_{\text{дв}} + T_{\text{разгр}} + T_{\text{пер}})}, \quad (12)$$

где ρ_k – плотность КМК, т/м³; n – количество загружаемых ковшей требуемое для наполнения бункера, $n = V_6/V_{\text{гр}}$; $T_{\text{дв}}$ – время передвижения к узлу перегрузки, $T_{\text{дв}} = 300$ с; $T_{\text{разгр}}$ – время выгрузки бункера на перегружатель $T_{\text{разгр}} = 300$ с; $T_{\text{пер}}$ – время передвижения прежнее или новое место сбора, $T_{\text{пер}} = 300$ с.

При длительности цикла до 15 с, объеме промежуточного бункера 7 м³ и времени $T_{\text{дв}} = T_{\text{разгр}} = T_{\text{пер}} = 300$ с, расчетная часовая производительность сборщика может составить до 13 т/ч.

В результате расчета по указанному алгоритму получен график зависимости производительности сбора КМК от мощности слоя рудной части корки, представленный на рисунке 12.

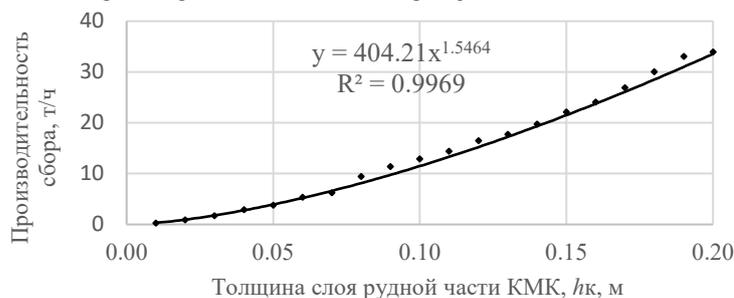


Рисунок 12 – График зависимости производительности сбора от толщины слоя рудной части КМК

Анализ графика показывает, что при мощности слоя рудной части КМК до 100 мм возможно добывать около 1 млн. т/год при использовании 10-ти одновременно работающих сборщиков, количество которых будет варьировать с изменением мощности КМК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную, научно-квалификационную работу, в которой, на основании установления закономерностей процесса разрушения кобальтоносных железомарганцевых корок разработано научно обоснованное техническое решение грейферного сборщика в условиях сложного рельефа дна океана, что вносит значительный вклад в развитие горной отрасли страны

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Произведен анализ известных конструкций и комплексов для подводной добычи, показывающий отсутствие достаточных теоретически обоснованных и экспериментально подтвержденных решений по извлечению кобальтоносных железомарганцевых корок, залегающих в основном в виде однородного массива на склонах подводных гор.

2. Проведены исследования физико-механических свойств кобальтоносных железомарганцевых корок, показавшие возможность транспортирования полученных теоретических и экспериментальных данных имеющихся образцов на массив полезного ископаемого в реальных горно-геологических условиях.

3. Разработаны методики проведения экспериментальных исследований процессов режущего и ударного взаимодействия грейферного исполнительного органа со встроенным ударником с массивом корок, предполагающие использование 4-х серий опытов по замеру глубины внедрения пики на маятниковом копре и силы внедрения инструмента на испытательной машине Zwick/Roell.

4. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден рост величины первоначального заглубления в 1,5 раза при наложении ударной нагрузки 7...10 Дж на режущие элементы грейферного исполнительного органа для слоя корки 50...100 мм.

5. Установлена экспоненциально убывающая зависимость удельной силы сопротивления смыканию челюстей грейферного исполнительного органа от глубины внедрения, которая максимальна при начале смыкания челюстей и уменьшается в 1,3 раза после увеличения начального внедрения в 1,5 раза в массив корки толщиной 50...100 мм.

6. Разработаны и запатентованы конструкции подводного сборщика для добычи кобальтоносных железомарганцевых корок с исполнительным органом в виде камер разрежения (патент № 193043), с грейферным исполнительным органом и встроенным ударником (патент № 203596), а также конструкции самих ударников (патенты № 2659045 и № 2720041).

7. Разработан алгоритм расчета производительности сбора и параметров функциональных элементов добычного комплекса, позволяющий осуществлять выбор оборудования для различных условий залегания кобальтоносных железомарганцевых корок.

8. Установлена экспоненциальная зависимость производительности сбора шагающего сборщика с грейферными исполнительными органами и встроенными в челюсти гидроударниками от толщины рудного слоя кобальтоносных железомарганцевых корок, показывающая, что при отработке корок толщиной 50...100 мм производительность сбора шагающего сборщика составит до 13 т/ч.

9. Предложенные схемные и конструктивные решения подводного сборщика кобальтоносных железомарганцевых корок с грейферными исполнительными органами с встроенными ударниками по оси ковша и/или в челюстях грейфера, а также методика расчета их основных параметров и производительности сбора приняты к внедрению обществом с ограниченной ответственностью «Гидравлический комплекс» (ГИКО) – организацией, специализирующейся в разработке аппаратов и устройств для разведки и добычи подводных полезных ископаемых, что подтверждается актом внедрения от 15.02.2022 г.

10. Результаты диссертационной работы в дальнейшем могут быть использованы для проектирования и расчета геологоразведочных и добычных комплексов месторождений подводных полезных ископаемых.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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.

2. 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.

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

3. 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.

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

5. Yungmeister, D.A. Choice of materials and justification of the parameters for the over-bit hammer / D.A. Yungmeister, A.I. Isaev, **R.I. Korolev**, A.I. Yacheikin // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1582(1), 012097.

Патенты:

6. Патент № 2659045 С1 Российская Федерация, МПК E21D 9/093, E21C 27/24. Перфоратор: № 2019105393 заявл. 26.02.2019, опубл. 01.10.2019 / Юнгмейстер Д.А., **Королев Р.И.**; заявитель СПГУ. – 9 с.: ил.

7. Патент RU 2720041 С1. Устройство для разрушения горных пород ударными импульсами / Д.А. Юнгмейстер, **Р.И. Королев**, А.И. Исаев, П.Д. Соболева. Опубл. 23.04.2020

8. Патент RU 193043 U1. Устройство для сбора железомарганцевых конкреций со дна морей / Д.А. Юнгмейстер, А.П. Исаев, С.Л. Сержан, **Р.И. Королев**, Э.О. Бородкин. Опубл. 11.10.2019

9. Патент RU 203596 U1. Устройство для сбора кобальто-марганцевых корок со дна морей / Д.А. Юнгмейстер, **Р.И. Королев**, С.Л. Сержан, Р.Ю. Уразбахтин. Опубл. 13.04.2021.

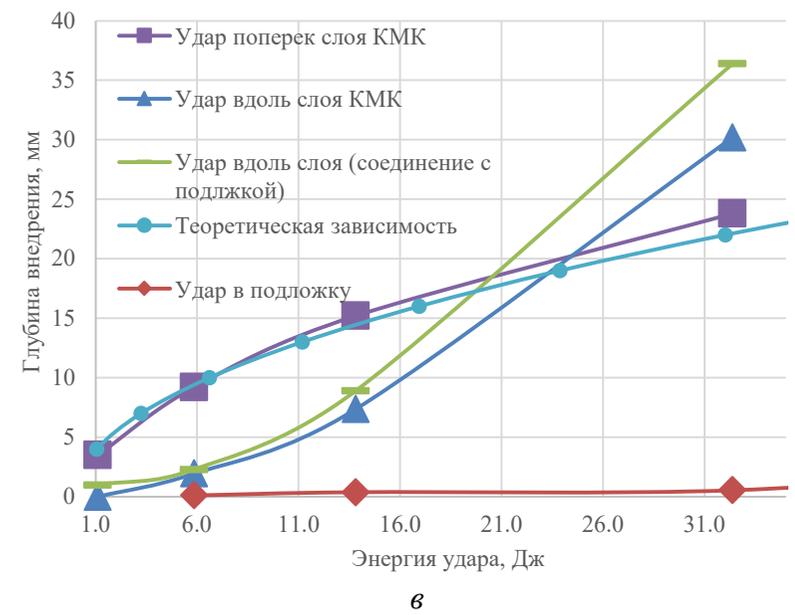
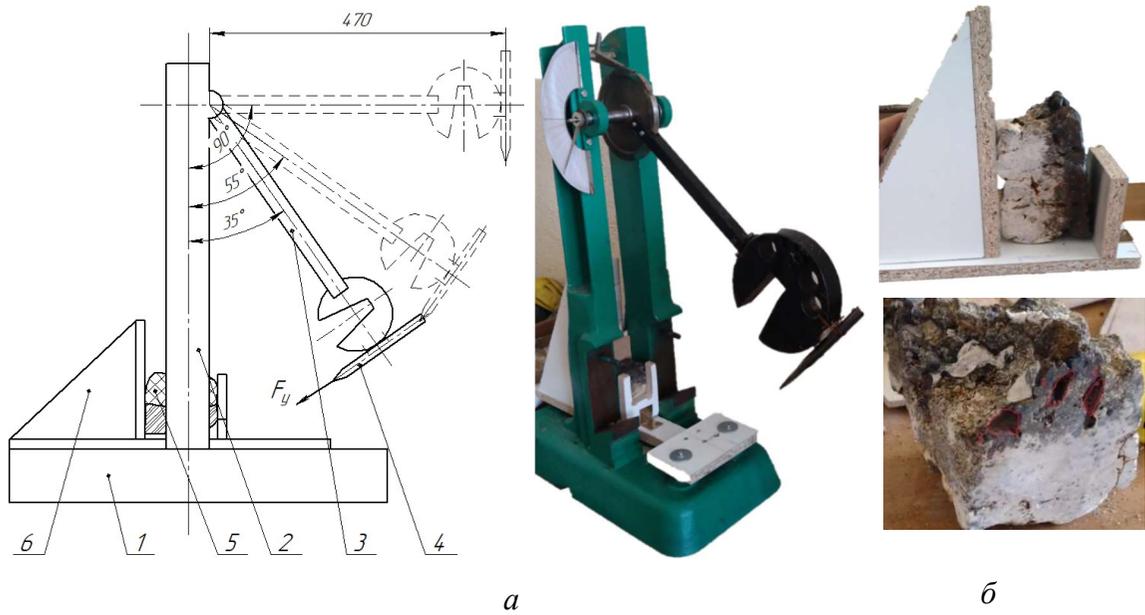


Рисунок 5 - Экспериментальные исследования разрушения КМК ударом: а) маятниковый копер, где 1 – станина; 2 – мачта; 3 – маятник; 4 – породоразрушающий инструмент; 5 – образец КМК; 6 – оснастка для закрепления образца; б) образцы КМК; в) график зависимости глубины внедрения от энергии удара

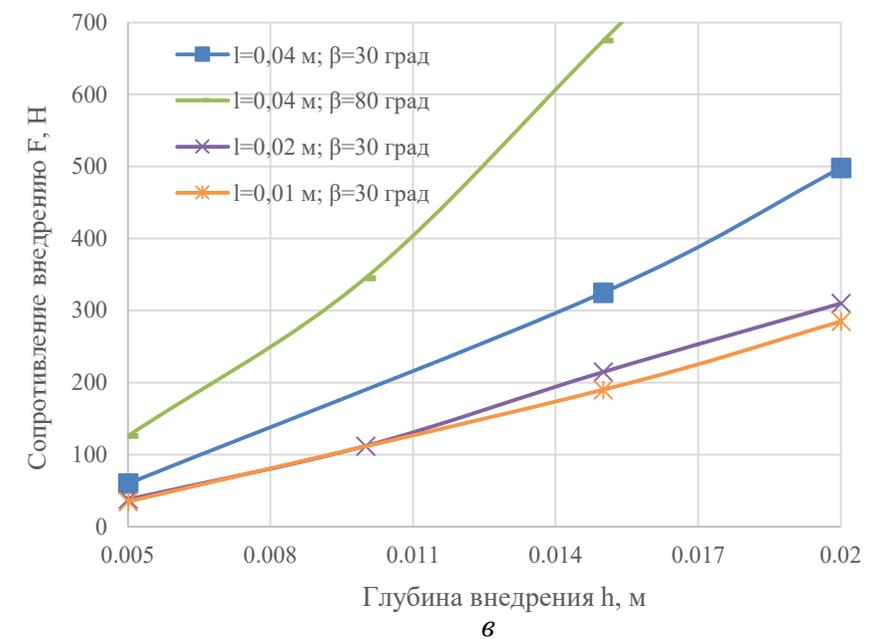
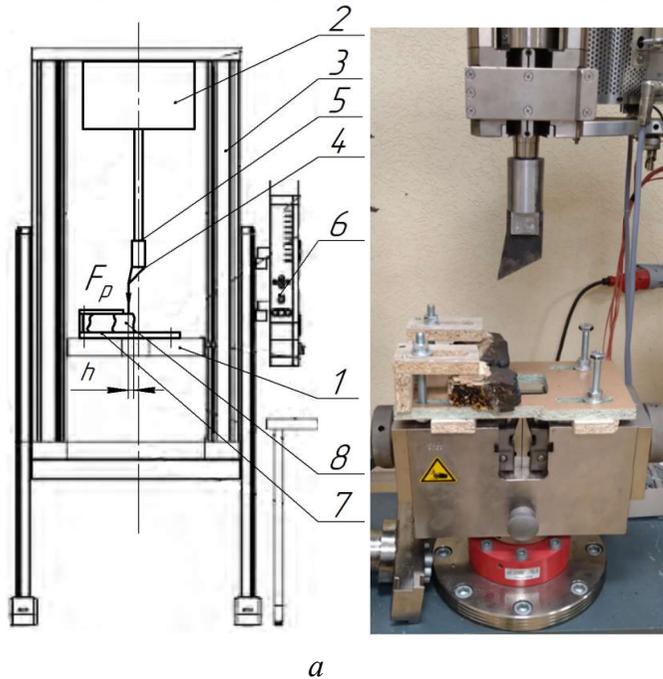


Рисунок 6 – Экспериментальные исследования разрушения КМК резанием: а - испытательная машина Zwick/Roell Z100, где 1 – неподвижная траверса; 2 – подвижная траверса; 3 – винтовая передача; 4 – резец; 5 – штанга; 6 – пульт управления; 7 – оснастка для закрепления образцов; 8 – образец КМК; б – породоразрушающий инструмент; в - график зависимости усилия резания от деформации сжатия КМК

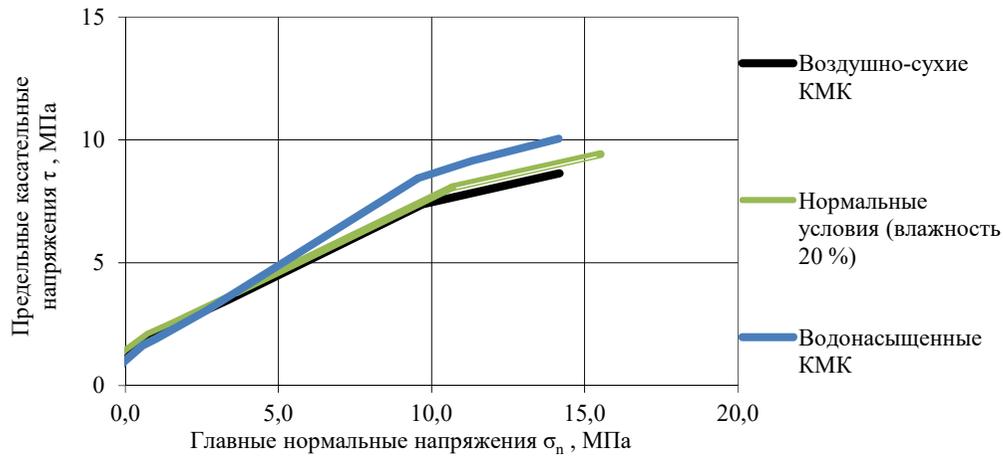
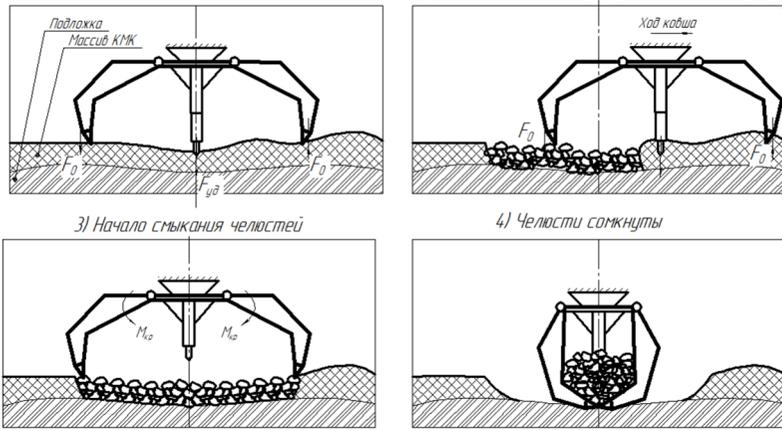


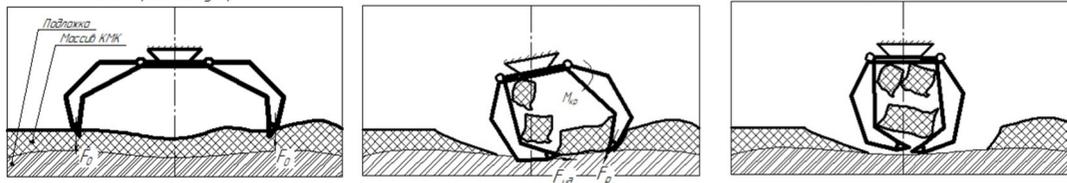
Рисунок 1 – Паспорт прочности КМК

1) Грейферный ковш в начальный момент 2) Перемещение ковша и разрушение массива ударом



а

1) Грейферный ковш внедряется в массив КМК с совершением удара 2) Смыкание челюстей ковша с совершением удара 3) Ковш закрыт



б

Рисунок 3 – Схемы сбора КМК грейферным исполнительным органом со встроенным ударником:
а – по оси ковша; б - в челюсти ковша

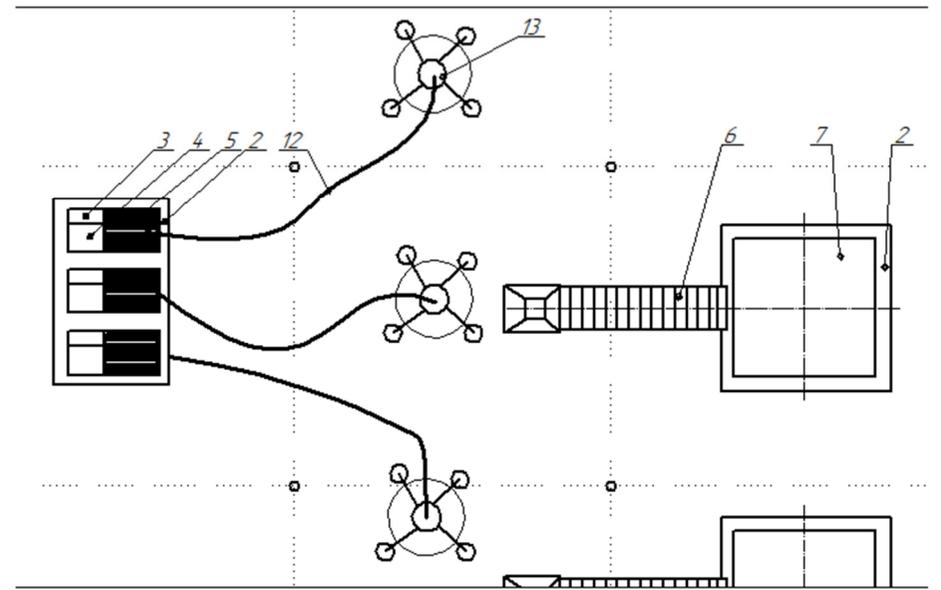
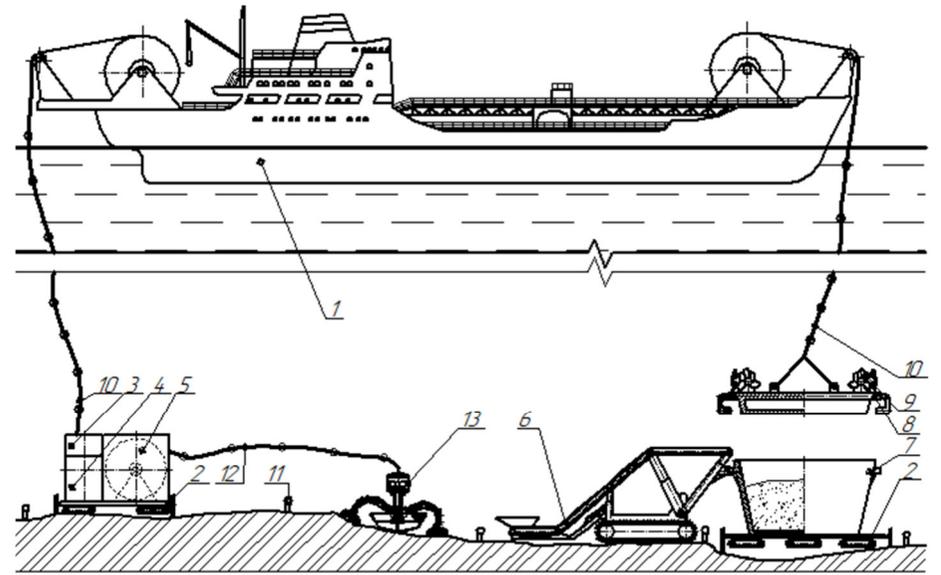


Рисунок 8 – Концепция сбора однородных КМК, где 1 - судно обеспечения; 2 - самоходные платформы на гусеничном ходу; 3 – трансформатор; 4 – маслостанция; 5 – лебедка с кабель-шлангом для питания сборщика; 6 – пластинчатый питатель; 7 - бадья (бункер); 8 - приспособления для захвата бадьи; 9 - рулевые винты; 10 – кабель-трос; 11 – система позиционирования; 12 – кабель-шланг; 13 – самоходный сборщик.

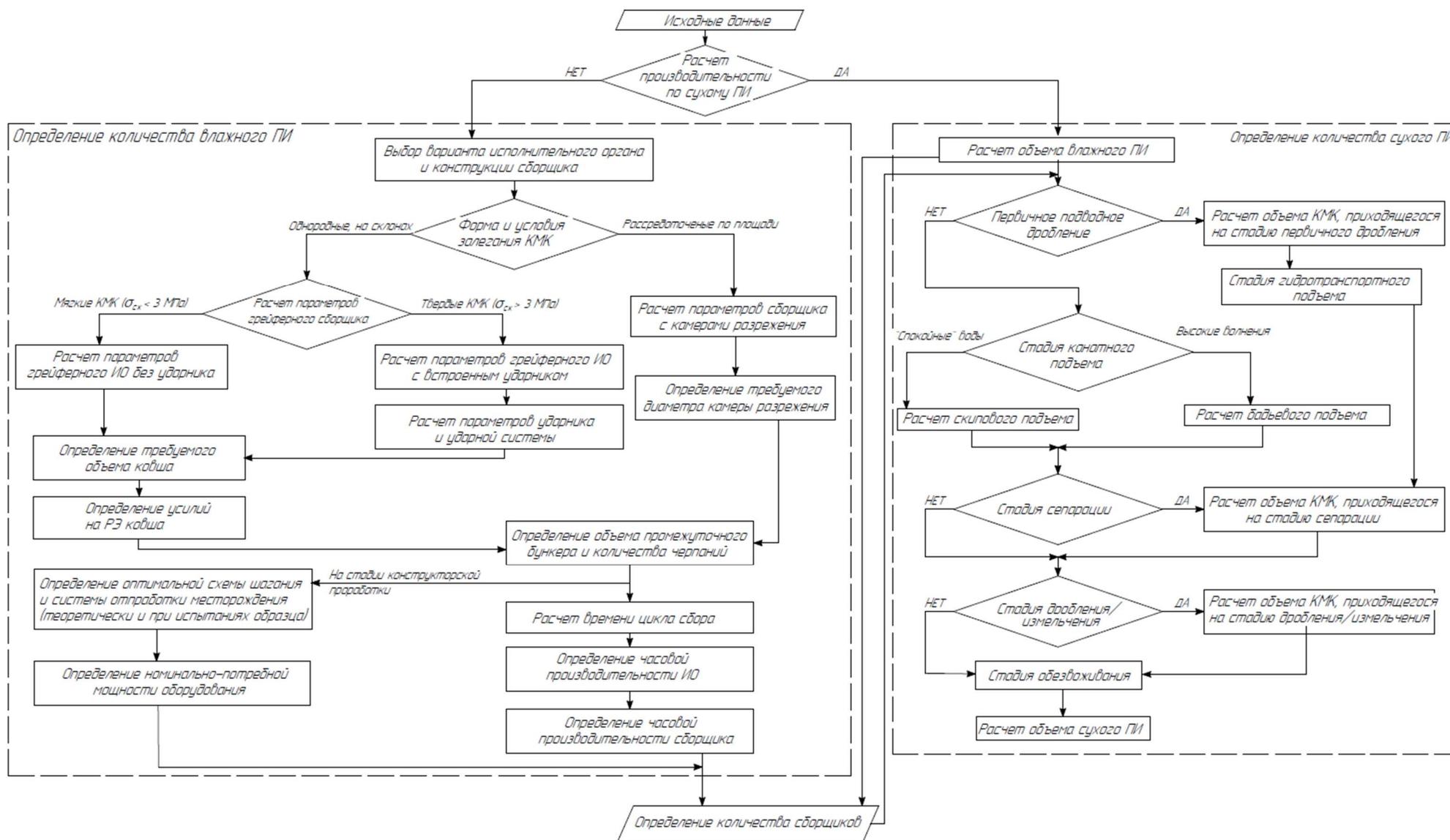


Рисунок 10 – Алгоритм расчета производительности комплекса, включающего подводный сборщик шагающего типа