

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Санкт-Петербург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ РАЗРАБОТКИ ПОДВОДНЫХ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.....	11
1.1 Общие сведения о ТПИ, залегающих на дне океанов	11
1.2 Анализ существующих технических средств подводной добычи	14
1.2.1 Анализ международных концепций подводной добычи ТПИ	18
1.2.2 Анализ особенностей устройств для добычи КМК	22
1.2.3 Анализ преимуществ и недостатков технических средств с обоснованием схемного решения сборщика КМК.....	24
1.3 Анализ конструкции исполнительных органов сборщиков	28
1.4 Анализ методик расчета исполнительного органа сборщика КМК	30
1.5 Выводы по главе 1	37
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КМК РЕЗАНИЕМ И УДАРОМ ГРЕЙФЕРНЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ОРГАНОМ ПОДВОДНОГО СБОРЩИКА	40
2.1 Определение компоновочной схемы и параметров устройства для добычи КМК	40
2.2 Теоретическое исследование физико-механических свойств КМК	42
2.3 Теоретическое исследование процесса разрушения КМК резанием.....	46
2.3.1 Усилия, возникающие на грейферном исполнительном органе при начальном внедрении в КМК.....	51
2.3.2 Усилия на грейферном исполнительном органе при смыкании челюстей....	56
2.3.3 Нестандартные способы разрушения КМК резанием.....	58
2.4 Теоретическое исследование процесса разрешения КМК ударом	60
2.5 Теоретическое обоснование прироста эффективности сбора КМК используя комбинированную схему захвата	66
2.6 Определение параметров расчета производительности глубоководного комплекса	68
2.7 Выводы по главе 2.....	70

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КМК ГРЕЙФЕРНЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ОРГАНОМ СО СКАЛЫВАЮЩИМ УЗЛОМ.....	72
3.1 Постановка цели и задач экспериментальных исследований	72
3.2 Стенды для исследований процесса разрушения КМК породоразрушающим инструментом	73
3.3 Разработка методики и последовательности проведения экспериментальных исследований	75
3.4 Результаты экспериментальных исследований разрушения КМК ударом.....	78
3.5 Результаты экспериментальных исследований разрушения КМК резанием ...	81
3.6 Обработка результатов эксперимента.....	82
3.7 Выводы по главе 3.....	88
ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР СХЕМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО СБОРА КМК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЗАЛЕГАНИЯ.....	90
4.1 Конструкция добычного комплекса для рассредоточенных по дну массивов КМК	90
4.2 Расчет технологического оборудования для глубоководной добычи с канатным подъемом	95
4.3 Концепция глубоководной добычи однородных массивов КМК.....	97
4.4 Конструкция глубоководного сборщика КМК с грейферным исполнительным органом с ударником по оси ковша.....	99
4.5 Конструкция грейферного исполнительного органа с встроенным ударником в челюсти ковша.....	101
4.6 Алгоритм оценки функционирования комплекса, включающего подводный сборщик.....	103
4.6.1 Определение параметров грейферного ковша.	105
4.6.2 Определение усилий на режущих элементах грейферного ковша	107
4.6.3 Расчет параметров ударника.....	108
4.6.4 Расчет производительности сборщика.....	109

4.7 Выводы по главе 4.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	116
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения результатов диссертационной работы ..	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Пример расчета производительности сборщика КМК с грейферными ИО и встроенными в челюсти ударниками	131

ВВЕДЕНИЕ

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. Батурин, 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. Мери, 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.

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.

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.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих **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.

Научная новизна

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 (приложение А).

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 математической статистики и проверкой адекватности теоретических положений.

Соответствие паспорту специальности

Тема исследования соответствует 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.

Положения, выносимые на защиту

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 дополнительной ударной нагрузки с энергией удара 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

стенде 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 грейферного исполнительного органа; в подготовке публикаций, отражающих основные положения и результаты диссертационной работы.

Публикации

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 международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получено 4 патента.

Структура диссертации

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ РАЗРАБОТКИ ПОДВОДНЫХ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

1.1 Общие сведения о ТПИ, залегающих на дне океанов

На сегодняшний день, минимально используемой частью планеты, с точки зрения горно-добычной деятельности, остается дно Мирового океана. Многочисленные разведочные мероприятия помогли понять, что дальнейшей стадией развития горной отрасли будет являться подводная добыча, так как под водной толщей залегают богатые по своему составу твердые полезные ископаемые (ТПИ) (рисунок 1.1): железомарганцевые конкреции (ЖМК); кобальтоносные железомарганцевые корки (КМК); глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС) [5, 6, 7, 19].

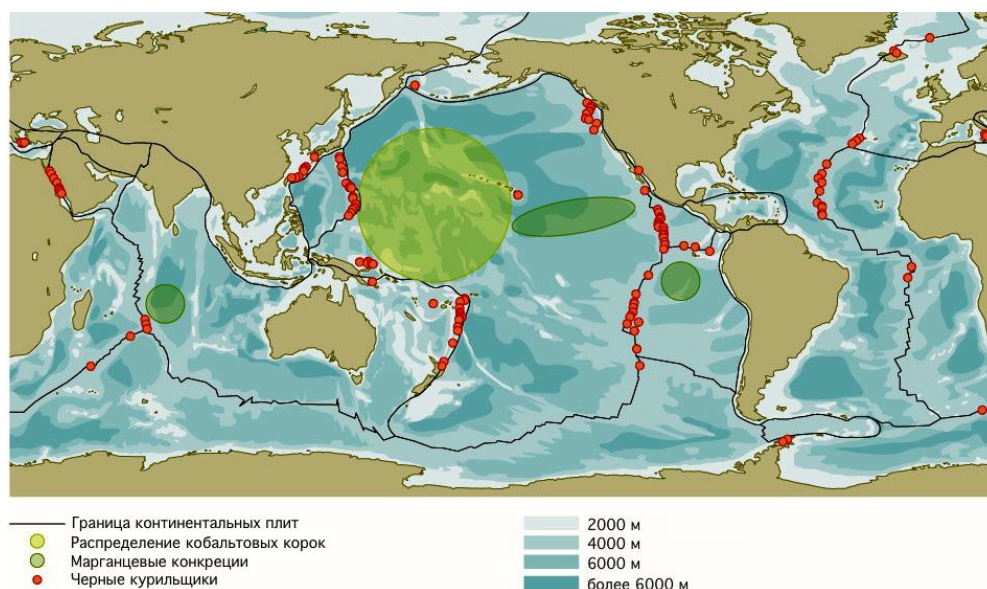


Рисунок 1.1 - Карта распределения участков залегания твердых полезных ископаемых [5]

Исторически, началом разведки с целью поиска полезных ископаемых под водой можно считать 1873 год, когда на дне океана впервые были найдены необычные темные камешки английской экспедицией «Челенджер» [10, 11, 21, 23]. Дальнейший химический анализ такой находки показал, что по составу они представляют, в основном, соединения железа и марганца, откуда и произошло название – железомарганцевые конкреции [4]. Также в разных долях в ЖМК найдены и другие металлы: никель, кобальт, медь, молибден, что позволяет отнести их к полиметаллическим рудам [52, 123].

Интерес к ЖМК в России, как и многих других стран, появился в 1987 году, о чем было заявлено в международных организациях, регулирующих данный вопрос. С целью дальнейшего изучения и промышленного освоения ЖМК, России по результатам распределения были отданы некоторые участки дна Тихого океана как наиболее богатые из найденных месторождений на тот момент [33], зафиксировав данный факт в международном сертификате [92]. С этого момента началась активная разработка различных вариантов технологий и оборудования для добычи подводных полезных ископаемых (ПИ) [8, 14, 38], а также промышленная добыча мелководных ЖМК в Финском заливе [4, 40], которая была остановлена в 2010 году после отработке залежей на глубине до 45 м. Так как масштабы разведки и перспектива промышленной добычи подводных месторождений увеличивались, в 1994 году Конвенцией по морскому праву создается Международная организация по морскому дну для регулирования вопросов природоохранной деятельности при подводной добычи [6].

По последним подсчетам, мировой запас ЖМК составляет около 1500 млрд. т [34], что намного превосходит объем добычи в разрабатываемых рудниках и карьерах.

Также хорошо изучены и уже разрабатываются месторождения ГПС, образованные в результате гидротермальных процессов, а именно тектонических сдвигов плит на глубинах воды около 1200-3500 м с образованием массивных подводных гор, состоящих из сульфидных руд [19, 114, 116]. Массивные горные тела сульфидов представляют высокий интерес для разработки, так как в основном состоят из востребованных металлов: Fe<40 %, Zn<25 %, Pb<25 % и Cu<15 % [6].

Самыми ценными и малоизученными являются КМК (рисунок 1.2), которые относятся также как и ЖМК к твердым железо-марганцевым полезным ископаемым, имеющим в своем составе значительное содержание кобальта (запасы которого на суше практически отработаны), молибдена, никеля и некоторых редкоземельных металлов, что делает данный вид ТПИ уникальным [113, 127].

КМК являются результатом многолетнего (около 10 млн. лет) напластования минерализованных осадков, покрывающих склоны подводных гор, как правило вулканического происхождения, своеобразным настом (коркой) толщиной до 400 мм и плотностью распределения до 200 кг/м^2 [49, 50, 51]. Результаты разведочных экспедиций установили, что корки обладают удельной плотностью $1,65 - 2,17 \text{ г/см}^3$, пористость может варьировать в пределах 43 – 74 %, а пределы прочности на сжатие и растяжение $0,5 - 16,8 \text{ МПа}$ и $0,1 - 2,3 \text{ МПа}$ соответственно [134].

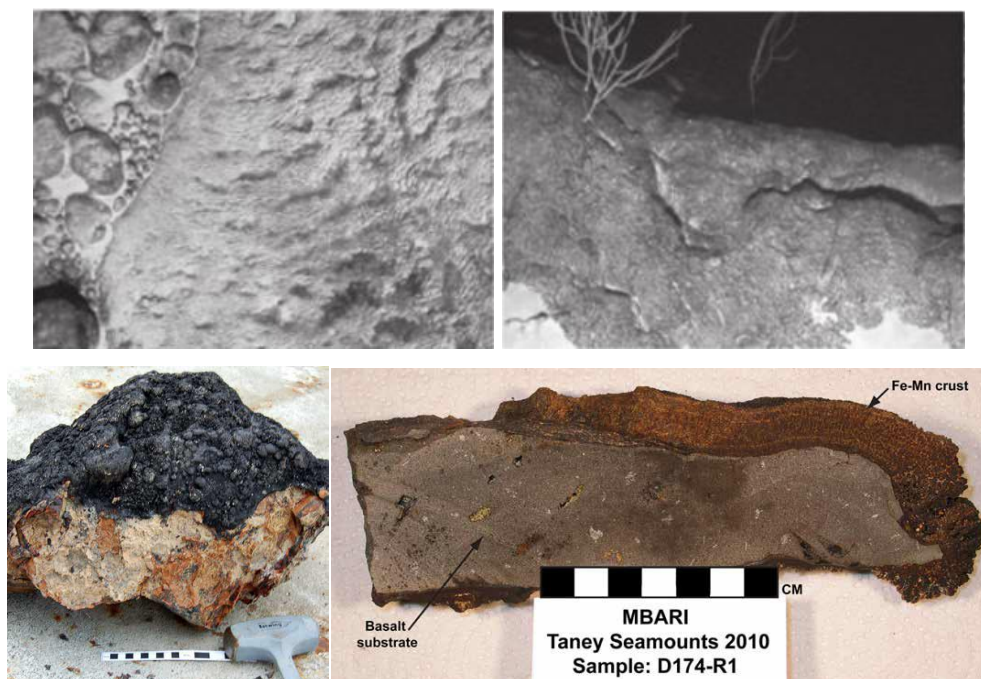


Рисунок 1.2 - Фотографии залегания КМК и извлеченных образцов [50]

Месторождения КМК представляют собой как отдельные подводные горы (гайоты), так и сгруппированные вулканотектонические массивы (рисунок 1.3). Гайоты – горы с плоской платообразной вершиной предположительно абразионного происхождения. Профиль склонов в общем случае выпукло-вогнутый, часто осложнен отрогами, горными постройками, многочисленными мезоформами (уступами, грядами, ложбинами), ориентированными вдоль или вкрест направления склонов [51].

Как правило, глубина залегания представляющих интерес месторождений КМК варьирует от 1000 до 3000 м. Суммарная площадь покрова КМК в пределах одного рудного поля, включающего несколько месторождений, может достигать

400 км², с запасами до 40 млн. т сухой руды [49, 128].

В 2001 году АО «Южморгеология» был подписан контракт на 15 лет на разведку двух участков дна Тихого океана общей площадью 75 тыс. км². Один расположен в глубоководной Восточно-Марианской котловине и является частью рудного гиганта Кларион-Клиппертон (залегание ЖМК) [131]. Другой приурочен к гайотам на глубине 2000 – 3500 м в районе отведенного России участка подводных Магеллановых гор (залегание КМК). Прогнозные ресурсы участков достигают 600 млн. т сухой рудной массы [49, 50].

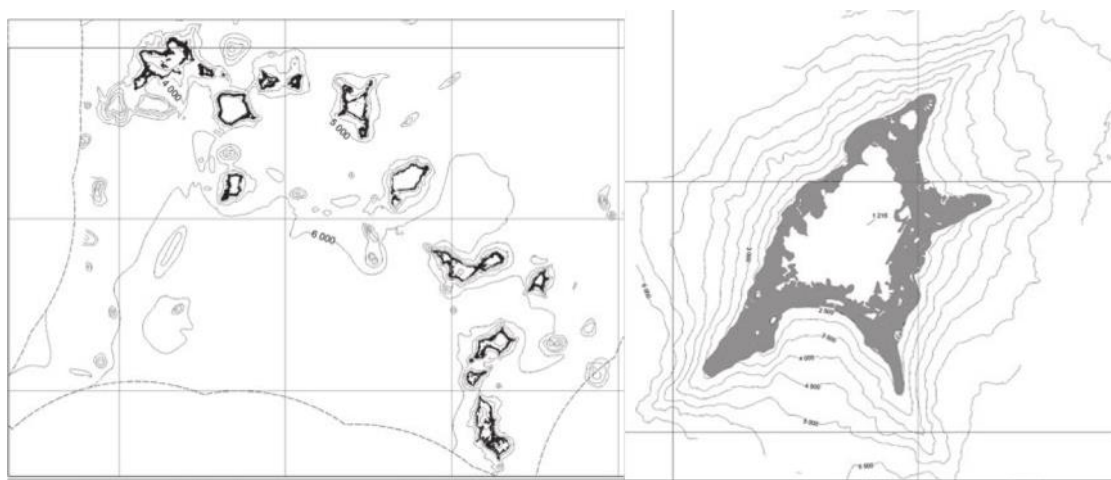


Рисунок 1.3 - Карта расположения рудных полей КМК в пределах Магеллановых гор (Тихий океан) [50]

Таким образом, в России с начала 21 века начинается активная подготовка к отработке ТПИ Мирового океана, начиная с ЖМК, ввиду своей простоты, с точки зрения сбора [16, 26, 27, 46]. Производится разработка концепций добычных комплексов и прототипов средств добычи (подводные сборщики, системы транспортировки [25, 38, 46, 112] со дна на судно обеспечения и вспомогательные устройства [37]).

1.2 Анализ существующих технических средств подводной добычи

Как уже говорилось выше, отечественная промышленная добыча подводных ТПИ окончилась на отработке мелководных месторождений ЖМК. На данный момент все разработки по созданию технических средств для подводной добычи на более глубоких участках остаются на этапе запатентованных и не апробированных [46, 55, 105].

Патентный поиск показывает, что с начала 1990-х годов зарегистрировано множество конструкций, как мелководных так и глубоководных устройств и комплексов для сбора океанических ТПИ, основанных на принципах ковшовых элеваторов, драглайнов, барабанных шнеков, эрлифтов, грейферных экскаваторов и драг [56, 57, 58, 59, 70, 72, 73, 74, 81, 100, 102]. Использование данных установок рентабельно исключительно на малых глубинах при определенных размерах ТПИ и параметрах поверхности дна. Сейчас задача стоит в разработке оборудования для подводной добычи богатых месторождений, залегающих на более глубоких участках, где даже невысокая производительность будет окупать затраты на их изготовление и использование.

Во всех разработанных комплексах для добычи океанических ТПИ можно выделить несколько основных агрегатов:

- 1) судно обеспечения с необходимой оснасткой;
- 2) транспортная система от места сбора (дна) до корабля обеспечения;
- 3) придонный агрегат (сборщик) для сбора полезного ископаемого.

С первым пунктом, как правило, проблемы не стоит, так как судоходство в мире развито в достаточной степени, и комплектация судна обеспечения будет напрямую зависеть от выбора способа транспортирования ПИ и придонного агрегата, однозначного технического решения которых на данный момент нет.

Подводным сборщиком следует называть такое устройство для сбора, которое является независимым от транспортной системы и выполняет функции по передвижению, поиску, сбору и накоплению собранного материала.

В основном сборщики разделяют на буксируемые и самоходные [124, 133]. Буксируемыми устройства для сбора называют потому, что их перенос с одной точки стояния на другую осуществляется кораблем обеспечения, например, подтягиванием кабель-троса судовой лебедки.

Руководствуясь общепринятой классификацией горных машин, подводные сборщики следует относить к выемочно-транспортирующим машинам (ВТМ) [45] по следующим особенностям:

- 1) отделение и перемещение горной массы от массива последовательно или одновременно с движением рабочего органа самой машины;
- 2) послойная отработка месторождения.

Рассмотрим последовательно (от самых простых до более сложных), разработанные отечественные комплексы для добычи глубоководных ТПИ.

Существует ряд идей с использованием подвесных грейферов или ковшей, опускаемых либо с судна обеспечения, либо непосредственно с плоской вершины гайотов.

На рисунке 1.4 *а* представлено самовсплывающее устройство для подводной разработки месторождений полезных ископаемых [74], принцип работы которого состоит в том, что сетчатый грейферный ковш *1* с армированными челюстями *2* связан с направляющим тросом *3*, а опускание и поднятие ковша осуществляется при помощи гибкой полости *14*, которая заполняется или опорожняется газом. Закрытие и открытие ковша осуществляет рычажный механизм *15*.

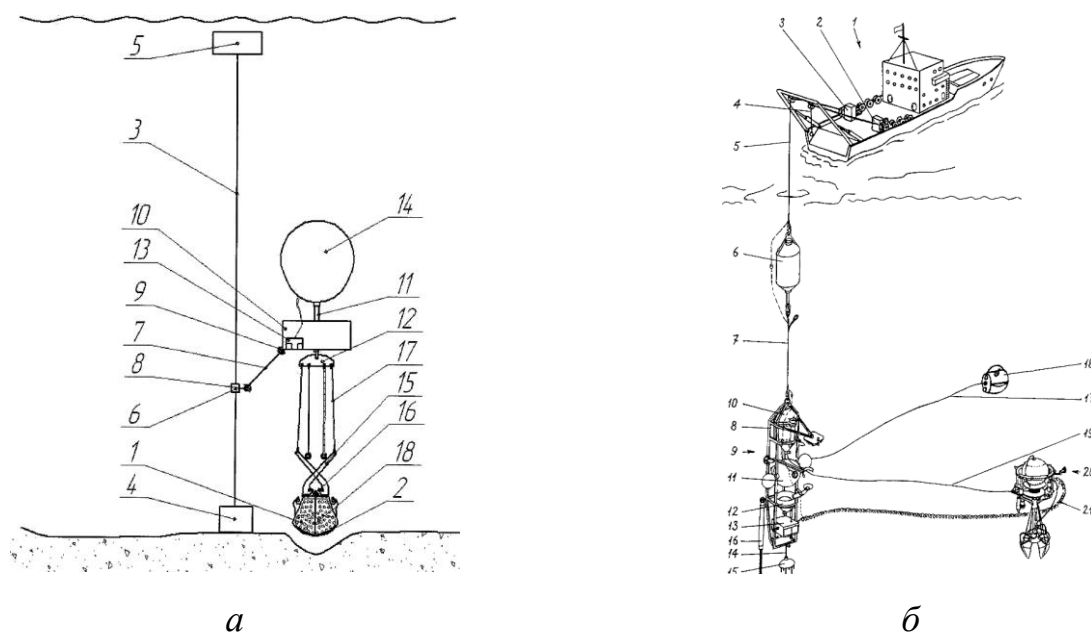


Рисунок 1.4 – Комплексы глубоководной добычи:

а - с самовсплывающим грейферным ковшом [74]; *б* - с роботизированным грейферным ковшом [75].

На рисунке 1.4 *б*, представлено устройство [75] для подводной добычи с использованием роботизированного грейферного ковша *20*, который захватывает

полезное ископаемое и транспортирует его в грузовой контейнер 12, размещенный на ферме 8 вместе с другим вспомогательным оборудованием. Все подводные устройства рассчитаны на 3-х дневное пребывание и сбор под водой, включая и человека, который в это время располагается в капсуле 18.

Самовсплывающие схемы вертикального транспортирования подводных ТПИ часто могут быть ограничены по области применения из-за сложности наполнения емкостей сжатым воздухом для глубин более 2 км [36].

Следующей отличительной конструкцией глубоководных комплексов сбора ТПИ считаются комплексы мачтового типа.

На рисунке 1.5 *а*, представлено устройство [76] для сбора ЖМК с закрепленным на мачте 6 исполнительным органом барабанного типа 7, который перемещаясь вдоль мачты производит сбор и транспортировку в накопительный бункер 3 полезного ископаемого. Количество мачт может быть две и более, а их перемещение возможно вокруг продольной оси питающего кабеля 11.

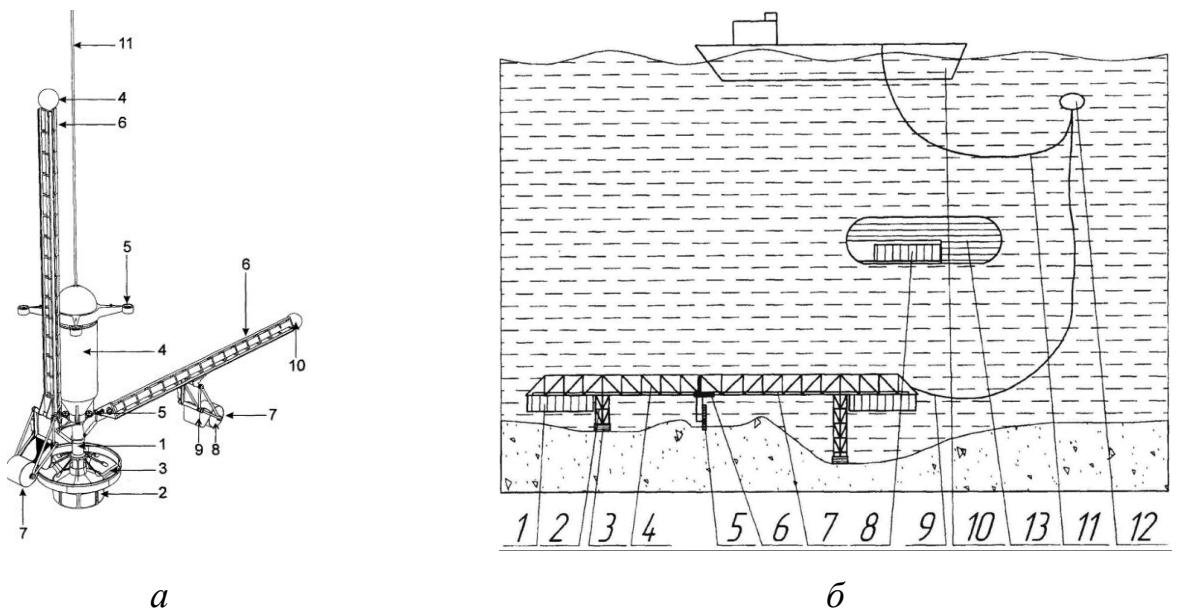


Рисунок 1.5 – Глубоководные комплексы мачтовой конструкции:

а - с самовсплывающим бункером [76]; *б* - с гидротранспортной системой подъема [77]

Придонный добычный агрегат 1 (рисунок 1.5, *б*) [77], выполнен в виде фермы 4, имеющей опоры 2 переменной высоты, опирающихся на гусеничные шасси 3. На ферме размещается одна или более тележки 5 с захватывающим устройством, передвигающиеся по направляющим 6 при помощи привода с

жесткой кинематической связью. Придонный агрегат также содержит цепочку конвейеров для транспортирования собранных ПИ либо в промежуточный бункер, либо сразу в трубопровод гидротранспортной системы. Для передачи ТПИ по трубопроводу на промежуточный модуль или судно имеется насос высокого давления 12. Переход с одного места сбора на другое осуществляется гусеничными тележками.

Аналогичный поиск по мировым разработкам дает понять, что в вопросе подводной добычи отечественные проработки значительно отстают, поэтому следует использовать уже опробованные идеи, которые рассмотрены далее.

1.2.1 Анализ международных концепций подводной добычи ТПИ

Одним из первых промышленным прототипом глубоководного добычного комплекса можно считать совместный комплекс агрегатов компаний SEDCO (США), INCO (Чехия), DOMCO (Япония) и AMR (Германия) [130]. Судно «Sedco 445» в апреле 1978 г. вышло в воды Тихого океана и произвело добычу ЖМК насосными агрегатами, которые размещались по длине трубопровода от дна до корабля с определенным шагом. Исполнительным органом являлся коллектор, который с помощью одних электродвигателей создавал завихрения, поднимающие конкреции, а с помощью других электродвигателей всасывал поднятые конкреции. Захваченные конкреции по трубопроводу поступали на корабль и там накапливались, после чего корабль плыл на берег. Все используемые узлы были специально разработаны под условия глубоководной добычи и были испытаны заранее [129].

Фирма Nautilus Minerals (Канада) [127] одним из вариантов для добычи ЖМК предлагает использовать сборщики-шнекоходы, которые собирают конкреции в валки, а каждый валок обрабатывается специальным устройством, имеющим связь в виде гидротранспорта с загрузочным устройством скипового подъемника.

Отдельно стоит отметить, что в ближайшие годы в море Бисмарка на глубине 1600 м компания Nautilus Minerals планирует промышленную разработку гидротермального меднорудного месторождения ГПС Solwara 1 [122]. Добыча

планируется осуществляться горными машинами по аналогии с шнековыми проходческими комбайнами (рисунок 1.6). Собранные полезные ископаемые в виде шламовой пульпы будут доставляться на поверхность гидротранспортом, осушаться на судне обеспечения и доставляться на сушу.

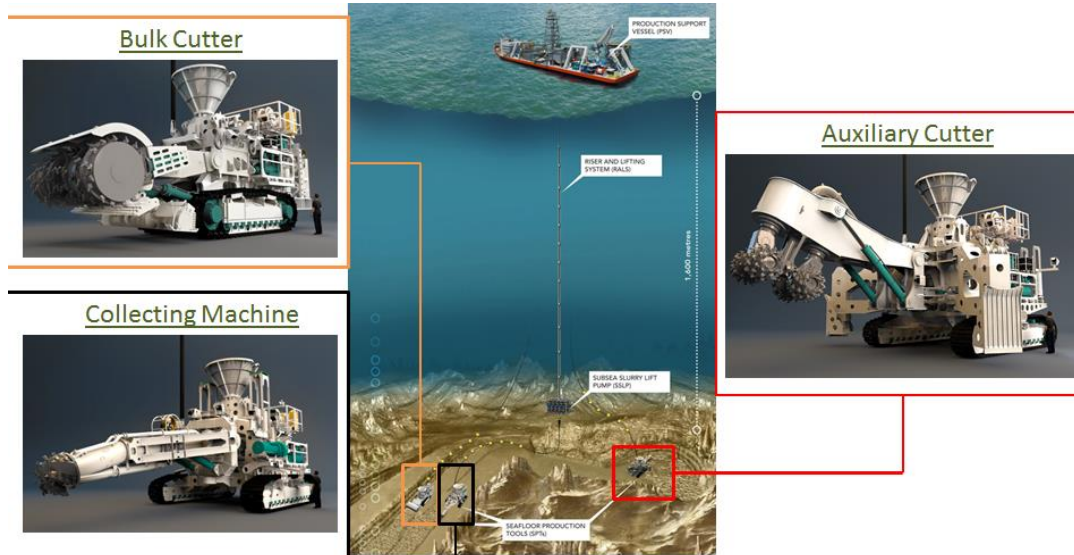


Рисунок 1.6 - Добычный комплекс концерна Nautilus Minerals [36]

Судно обеспечения представляет собой 227-ми метровый корабль с высокоточной системой позиционирования, устройствами спуска/подъема оборудования в необходимую точку океанического дна, помещениями для обслуживания данного оборудования, а также комплексом предварительного обогащения и хранения добытой шламовой пульпы.

Глубоководная техника для обработки месторождения Solwara 1 [122] разделена по базовым операциям: Auxiliary Cutter – выравнивание фрезерным рыхлителем почвы; Bulk Cutter – вскрытие и дробление режущим барабаном; Collecting Machine – сбор и подача пульпы с полезным ископаемым в трубопровод. Геометрия и мощность резания комбайнов рассчитана так, чтобы на выходе получались скругленные куски породы около 5 см в диаметре. Это позволит добиться оптимальной консистенции пульпы и снизить абразивный износ и риск заштыбовки трубопровода.

С экологической точки зрения воздействие от данной схемы обработки ГПС будет иметь существенный характер, поэтому разрабатываются технологии для возврата воды, отделенной от полезного компонента, обратно на глубину, и

повторного заселения придонной фауны микроорганизмами.

Вторым особенным недостатком является крайне высокая себестоимость добычи. Затраты немного компенсируются дороговизной полезного ископаемого в рассматриваемом месторождении, однако для менее богатых участков или, например, для участков ЖМК применять такую схему будет нерентабельно.

Схожая с Nautilus Minerals Японская концепция [123, 125] выделяет два судна обеспечения, гидротранспортную систему подъема и самоходный добычный агрегат. Одно судно служит для питания добычного агрегата через кабель-трос, второе соединено трубопроводом и выполняет функцию рудосклада с возможностью уплыть для разгрузки и возвращаться обратно.

Добычная машина (рисунок 1.7) выполняет все базовые функции по добычи ПИ, которые в предыдущей концепции были разделены. Сборщик перемещается на 4-х независимых гусеницах и состоит из нескольких технологических узлов, каждый из которых выполняет свою функцию: подготовка, добыча, хранение, транспортирование ПИ, перемещение самой машины, управление и разведка.

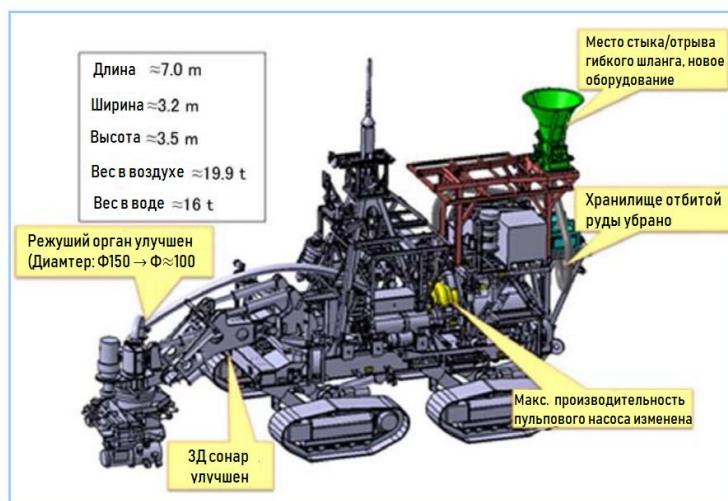


Рисунок 1.7 - Японский агрегат для разрушения и сбора месторождений ГПС

Процесс подготовки и добычи полезного ископаемого совмещен. Исполнительный орган представляет собой сдвоенную фрезу (барбанную и корончатую), которой производит углубление, резание и сбор ПИ всасыванием, создаваемым пульпонасосом через трубку в фрезу. Далее собранный материал, пройдя через машину, перемещается сначала в гибкий участок трубопровода, а затем в жесткий основной став трубопровода для транспортировки на

поверхность. Рабочий насос, служащий для перемещения ПИ на судно, соединяет жесткий и гибкий участки и находится выше агрегата примерно на 50 м.

Работа ходовой тележки осуществляется погружными двигатель-насосами, сообщающимися с системой навигации, которые перемещают машину в необходимую точку.

Функцию разведки выполняет размещенное на сборщике оборудование: камера, прожектора, гидролокаторы. С их помощью производится доразведка окружающей местности уже непосредственно на дне океана.

Испытания показали возможность использования данной технологии для добычи ГПС и КМК, но остался нерешенным вопрос регулирования величины заглубления и выборочного сбора [115, 116].

Индийская концепция добычи глубоководных ЖМК (рисунок 1.8) также предлагает использование корабля обеспечения, гидротранспортной подъемной системы и самоходного сборщика на гусеничном ходу, испытания которого уже проводились на дне Индийского океана [133].

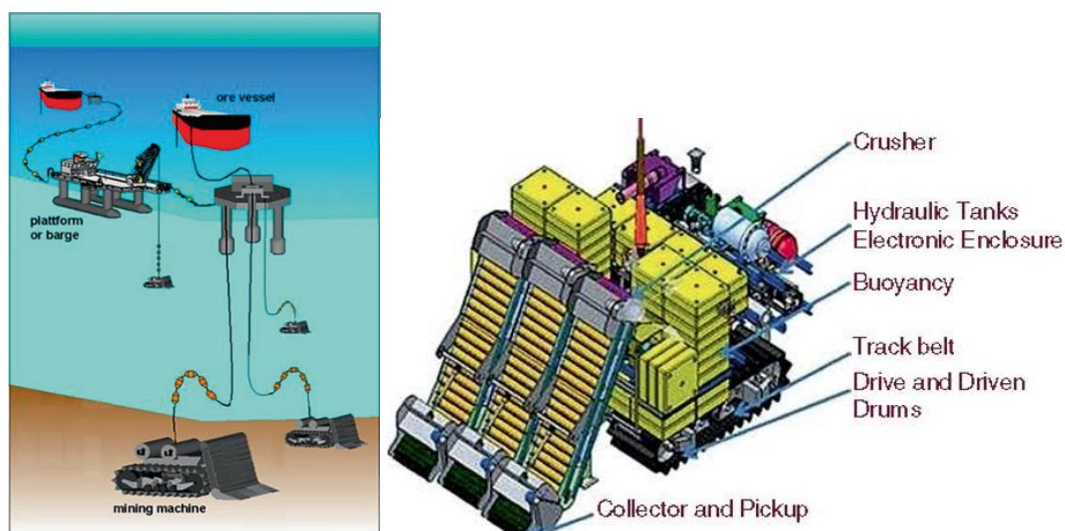


Рисунок 1.8 - Индийская концепция добычи ЖМК [133]

Исполнительным органом Индийского сборщика является скребковые конвейеры с вертикально замкнутой цепью и гибкими скребками из прочного полиэтилена. Гусеницы разработаны таким образом, чтобы минимизировать удельное давление на придонной области и подстилающие массивы.

Весьма схожая с Индийской - Голландская концепция Blue Nodules (рисунок 1.9) [124, 127]. Их комплекс незначительно отличается в технической

реализации каждого из аппаратов. В целом же Голландский сборщик работает по принципу сбора ЖМК. Особое внимание в концепции Blue Nodules уделено проблеме экологического воздействия, поэтому они серьезно ведут речь не только о добыче, но и о последующей рекультивации, подразумевающей замену собранных ЖМК на искусственные донные отложения с восстановлением флоры и фауны.

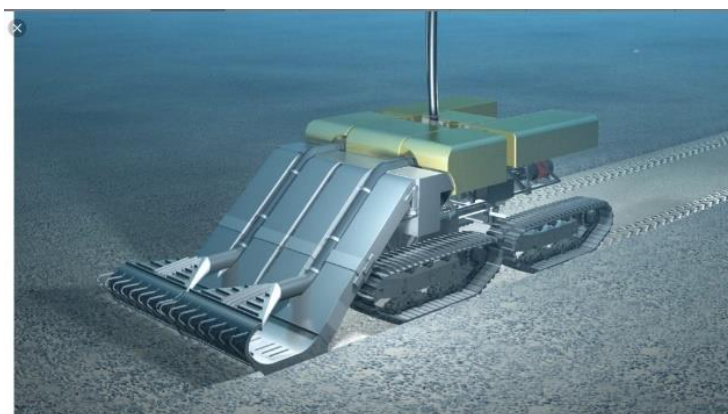


Рисунок 1.9 - Концепция Blue Nodules [127]

1.2.2 Анализ особенностей устройств для добычи КМК

С технологической точки зрения, добыча КМК является гораздо более сложной, чем ЖМК и ГПС. Переменная толщина корок и сложнорельефные условия залегания создают значительные сложности при проектировании и эксплуатации дистанционно управляемых устройств для сбора КМК. Большинство конструкторских и инженерных решений, относящихся к добыче КМК, находятся в стадии разработки, поэтому сведения о них не являются общедоступными [124].

Проводя поиск по отечественным патентам, можно сделать вывод о том, что полноценных комплексов для сбора КМК крайне мало.

Рассмотрим устройства, относящиеся к буксируемым агрегатам для сбора КМК. На рисунке 1.10 *a*, представлен агрегат [78] в виде одного исполнительного органа 2, на котором закреплен породоразрушающий инструмент 2б, представляющий собой плиту с пирамидальными выступами. Движительной силой, которая приводит в действие все узлы агрегата, является, непосредственно, окружающая жидкость. Путем перетекания по различным внутренним каналам

она является балластом и рабочей жидкостью гидросистемы, которая двигает исполнительный орган, заставляя его совершать возвратно-поступательные движения по КМК, разрушая их с определенным размером куска. Отколотые корки всасыванием через трубу 31 поступают в резервуар для хранения, а после его наполнения - в основной трубопровод гидротранспортной системы для подъема на судно обеспечения.

Схожим по принципу действия, но ограниченным своим объемом заполнения является устройство [79], представленное на рисунке 1.10 б. В нем имеется два исполнительных органа 2, в виде подпружиненных камер, с закрепленным породоразрушающим инструментом 22, которые также совершая возвратно-поступательные движения откалывают корки и собирают их во внутренней полости агрегата. Данное устройство не имеет транспортной системы и после наполнения поднимается на поверхность для опорожнения.

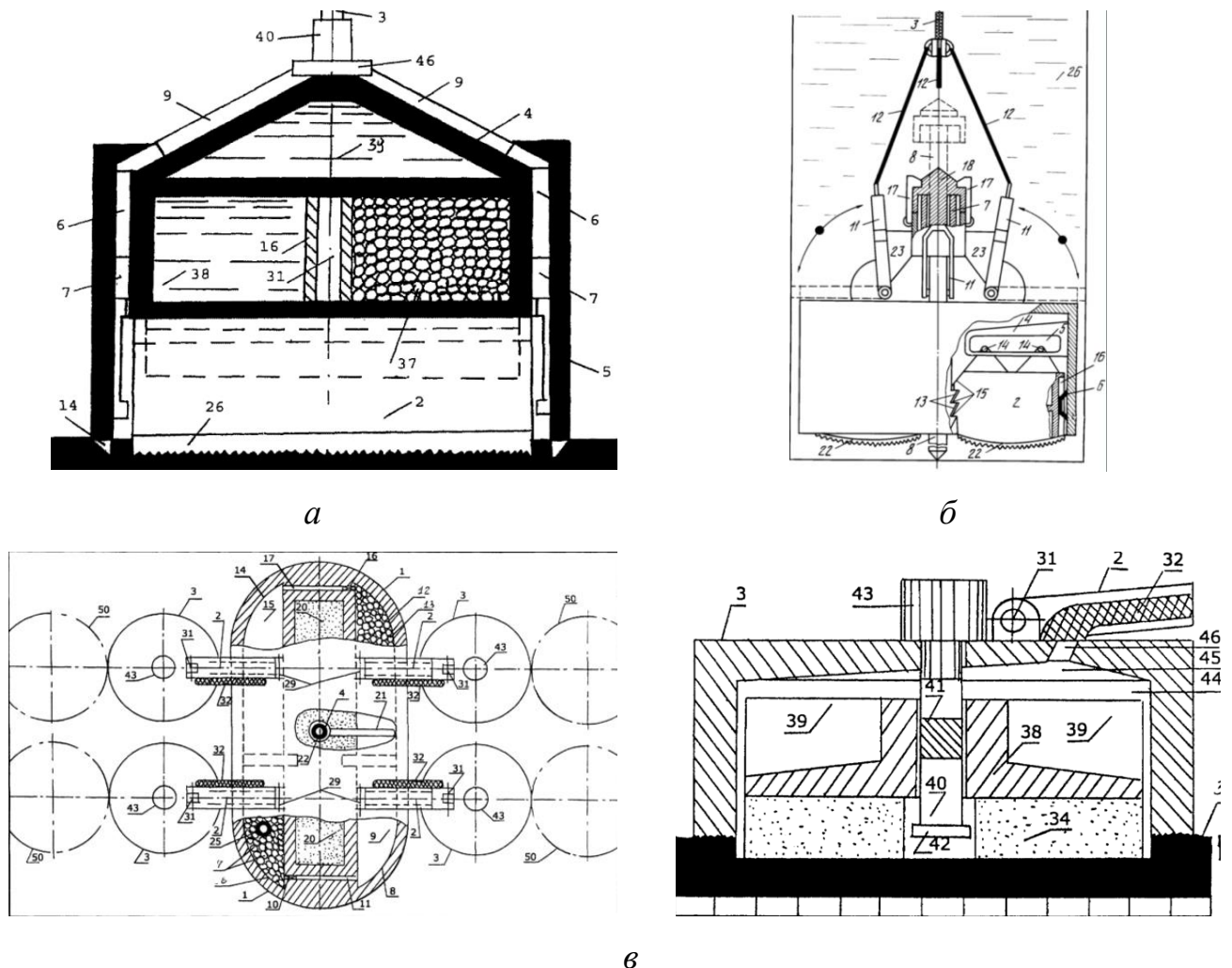


Рисунок 1.10 - Агрегаты для сбора КМК

Более сложным является устройство [80], представленное на рисунке 1.10 в. В этом агрегате имеется четыре исполнительных органа 3, работающих по принципу предыдущих агрегатов, которые закреплены на манипуляторах 2, тем самым увеличивая обрабатываемую область на одном месте стояния. В корпусе агрегата имеются полости для хранения КМК, а подъем собранного материала осуществляется по гидротранспортной системе.

Из иностранных устройств выделяются две концепции для сбора КМК: американская (рисунок 1.11, а) [113] и индийская (рисунок 1.11, б). В обоих используется гидротранспортная система подъема и сборщик на гусеничном ходу, исполнительным органом которого является режцовые барабаны, предназначенные для рыхления слоя КМК. Далее разрыхленные КМК всасываются через трубопроводы и диффузоры в бункер промежуточного хранения и отправляются через трубопровод на поверхность.

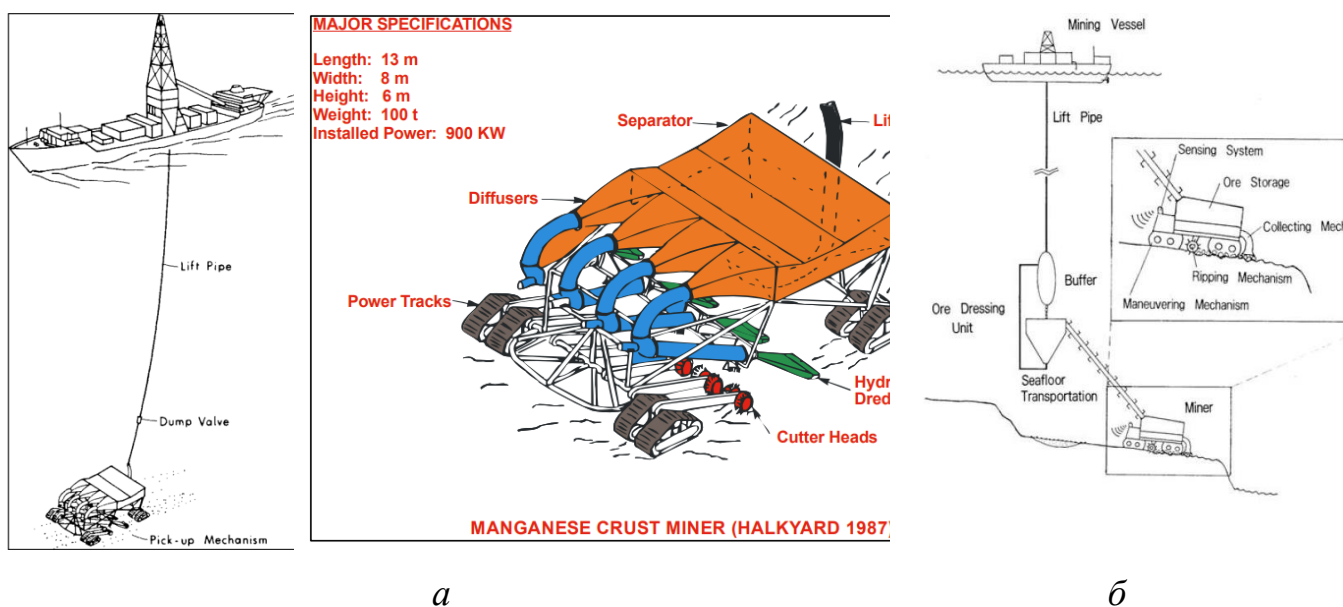


Рисунок 1.11 – Иностранные концепции сбора КМК:

а - Американская [124]; б - Индийская [134]

1.2.3 Анализ преимуществ и недостатков технических средств с обоснованием схемного решения сборщика КМК

Выделив преимущества, использованных решений в рассмотренных комплексах, можно сделать выводы, что однозначным при освоении глубоководных месторождений является:

- использование судна (судов) обеспечения с лебедками, силовым

электрооборудованием, установками сортировки и первичного обогащения, собранного полезного ископаемого и бункером для обогащенной руды, которое должно располагаться максимально близко к участку разработки [133];

- сброс отходов, после первичного обогащения на судне обеспечения в глубинные слои, ниже подводных течений, исключая создание илистого шлейфа в поверхностных слоях, а также загрязнения продуктами обогащения [125];

- использование самоходных агрегатов (сборщиков) с наименьшим количеством движений за цикл, минимизирующих создание илистого шлейфа, а также со средствами защиты от прижатия к мягким отложениям дна.

Также, анализируя рассмотренные выше комплексы и устройства для сбора подводных ТПИ, следует выделить общие недостатки их конструкций, которые важны для устройств добычи КМК.

1. Недостатки устройств на гусеничных тележках:

- узкая специализация, которая ограничивается только рассыпчатыми ТПИ на ровных, горизонтальных участках дна, то есть их невозможно использовать для сбора КМК, так как высокая концентрация КМК сосредоточена на крутонаклонных участках гайотов;

- малое тяговое усилие (сила трогания) для несвязных грунтов (илов) и малого удельного давления гусениц на грунт (широкие гусеницы, разнесенные друг относительно друга). С другой стороны, при большом удельном давлении (узкие, сближенные гусеницы) – возможность «утонуть» в илу или буксовать, а значит оставлять глубокий след;

- низкая экологичность из-за остатка следа на дне и шлейфа от ила.

2. Недостатки крупных конструкций типа ферм, экскаваторов, драглайнов:

- затраты на длительные монтажные операции;

- высокая парусность конструкций;

- самые высокие экономические затраты на разработку.

3. Недостатки гидротранспортной системы подъема:

- для передачи собранных ТПИ на поверхность необходимо устанавливать дополнительную дробилку либо внутри сборщика, либо отдельно перед загрузкой

в коллектор, причем это справедливо и для крупных ЖМК, размер которых может достигать до 200 мм;

- необходимо создание уникального става труб с нулевой плавучестью, высокой прочностью, низким коэффициентом трения внутренней поверхности и пульпы [122], высокой контактной прочностью наружной поверхности, а также использование погружной «капсулы» [94] или множества промежуточных насосных станций [48, 95].

4. Недостатки канатных систем подъема:

- необходимость разработки и освоения производства кабель-тросов повышенной прочности, например, с навивкой из кевлара [37, 108, 109, 111];

- сложность контроля процесса перегрузки и загрузки в скипы, так как требуются промежуточные бункеры и питатели;

- необходима разработка конструкций устройств для компенсации вертикальных колебаний троса (динамическое воздействие поднимаемого аппарата на трос, волнение моря, воздействие на трос и поднимаемый или спускаемый сосуд подводных течений);

- эффективность применения зависит от непрерывности потока полезного ископаемого, а также минимальных временных затрат на спуск и подъем (скорость подъема ограничена экстремальным ростом силы сопротивления перемещению скипа для больших скоростей);

- невозможность применение многоканатных подъемных установок на открытых морях со значительным волнением.

Однако, 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 [119].

Для более наглядного представления всех рассмотренных систем и комплексов проведем параметрический анализ наиболее значимых устройств для сбора ТПИ (таблица 1.1). Выставленные оценки (1,0 – максимум, 0,1 – минимум)

являются числовым обозначением результата анализа, показывающим какое техническое решение в зависимости от параметров и выполняемых функций наиболее предпочтительно. Для того, чтобы понять, какая функция, а, соответственно, и устройство в целом будет отвечать предъявляемым требованиям: влияние на экологию и обоснованные технико-экономические показатели - вводится коэффициент значимости этого требования, который, как правило будет не одинаковым.

В случаях выбора оптимальной конструкции сборщиков (таблица 1.1), приоритет «экология» является ключевым, так как при работе сборщика происходит непосредственный контакт с поверхностью дна, включая придонный биоценоз [118]. Также анализ конструкций показал, что существует возможность разработать устройства, минимизирующие воздействие на окружающую среду до приемлемого.

Таблица 1.1 - Параметрический анализ конструкций сборщиков

Функции	Кэф. важности	Варианты сборщиков			
		Шагающие	На гусеничном ходу	С многоковшовыми элеваторами	Самовсплывающие и автономные
Высокая производительность	1,0	0,6	0,8	0,9	0,6
Простота конструкции	0,7	0,7	1,0	0,6	0,5
Высокий КПД	0,8	1,0	0,7	0,8	0,6
Воздействие на окружающую среду	1,0	1,0	0,6	0,4	0,8
Восприятие волнения от судна	0,8	0,9	1,0	0,4	0,4
Возможность самостоятельного перемещения	0,9	1,0	0,8	0,5	0,3
Минимальная стоимость изготовления	0,6	0,6	0,5	0,4	1,0
Суммарная оценка		4,6	4,5	3,4	4,0

Проведенный параметрический анализ наглядно показывает, что шагающие подводные сборщики с рукоятями (манипуляторами), являются универсальной концепцией. Также при реализации функций разрушения (рыхления) возможно использовать для сбора всех трех типов ТПИ.

1.3 Анализ конструкции исполнительных органов сборщиков

Исполнительные органы ВТМ делятся согласно их назначению на следующие виды [84]:

- разрушающие породу, отделяющие ее от массива для дальнейшего транспортирования (ударники и рыхлители);
- послойно отделяющие породу от массива для ее перемещения без применения емкостей при движении машины (отвалы бульдозеров, ножи автогрейдеров, струги);
- отделяющие породу от массива с последующим ее транспортированием при движении всей машины или ее части с применением ковша (ковшовые погрузчики, скреперы);
- отделяющие породу от массива с применением режущей кромки для дальнейшей подачи породы к погрузочному устройству (скреперы с элеваторной загрузкой);
- грузозахватные устройства (ГЗУ), захватывающие породу и транспортирующие её в отвалы или накопительные емкости (грейферы).

Устройства селективного отбора рассыпчатых ТПИ не смогут захватить корки, кроме того, сбор КМК с целью дальнейшего транспортирования на судно обеспечения будет требовать их предварительного разрушения, разрыхления.

Поэтому для исполнительного органа сборщика КМК предъявляются следующие требования:

- реализация функций разрушения (разрыхления, резания) путем установки на машину для сбора устройств, осуществляющих удар или срез, например, шнеки с резцами, манипулятор с ударником или ковш;
- реализация функций погрузки/разгрузки в бункер промежуточного хранения, а также из бункера промежуточного хранения в транспортную систему;
- возможное совмещение функций перемещения, фиксации на склонах гайотов, разрушения, сбора и экскавации.

Производя аналогичный параметрический анализ исполнительных органов с целью обоснования устройства для сбора КМК (таблица 1.2), была выявлена

зависимость: при уменьшении воздействия на окружающую среду уменьшается целесообразность и рентабельность добычи данных ископаемых. На данный момент устройств для приемлемой минимизации воздействия на окружающую среду нет даже в виде концептуальных разработок. Поэтому, такие устройства для сбора будут разрабатываться на стыке двух приоритетов «экология» и «техно-экономические показатели».

Таблица 1.2 - Параметрический анализ исполнительных органов сборщиков

Функции	Коэф. важности**	Варианты ГЗУ					
		Вакуумные захваты	Гидрорыхлители и гидрозхваты	Резцовые барабаны	Шнеки, диски, шарошки	Ковши на канатах, или на цепях	Грейферные ковши с ударником
Высокая производительность	1,0**, 0,5*	0,6	0,9	1,0	0,8	0,5	0,6
Возможность селективного отбора	0,9**, 0,9*	1,0	0,8	0,6	0,7	0,6	0,9
Разрушение массива	0,8**, 0,2*	0,1	0,9	0,7	0,8	0,5	0,9
Воздействие на окружающую среду	0,5**, 1,0*	1,0	0,7	0,6	0,7	0,5	0,9
Низкие удельные энергозатраты	0,8**, 0,4*	0,8	0,7	1,0	0,7	0,6	0,8
Высокий КПД	0,9**, 0,2*	0,6	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8
Простота собственной конструкции	0,6**, 0,2*	0,9	0,8	0,7	0,6	0,8	0,9
Возможность транспортирования в габаритах сборщика	0,3**, 0,7*	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	1,0
Суммарная оценка		4,07**	4,78**	4,61**	4,3**	3,4**	4,78**
		3,47*	3,3*	3,11*	3,01*	2,4*	3,55*
* Коэффициент значимости, соответствующий максимальному приоритету требования «экология».							
** Коэффициент значимости, соответствующий максимальному приоритету требования «техно-экономические показатели».							

Исходя из всего вышесказанного и выбранной наиболее подходящей компоновочной схемы глубоководного сборщика шагающего типа, исполнительным органом, отвечающим всем требованиям и рассматриваемым в данной работе, будет являться: ГЗУ грейферного типа с устройством

предварительного разрушения глубоководного массива КМК (ударником), встроенным в ГЗУ или отдельно установленном на сборщике.

1.4 Анализ методик расчета исполнительного органа сборщика КМК

Так как рассматриваемый исполнительный орган будет являться уникальным и полноценных методик его расчета нет, следует опираться на уже существующие, для различных исполнительных органов горных (землеройных) машин, осуществляющие аналогичные операции:

- 1) резание (рыхление) – расчеты зубьев ковшей, ножей рыхлителя, резцов комбайна;
- 2) копание (зачерпывание) – расчеты ковшей;
- 3) удар (разрушение) – расчеты ударника, перфоратора.

В процессе работы ковшовые исполнительные органы осуществляют процесс внедрения, резания (рыхление), а затем зачерпывания поднятием ковша или смыканием челюстей (в случаях грейферов).

Основным параметром для расчета таких исполнительных органов является расчет величины сопротивляемости резанию (внедрению), которая должна быть меньше усилия подачи исполнительного органа.

Огромный вклад в изучение процесса разрушения горных пород резанием внесли Горячкин В.П., Зеленин А.Н., Берон А.И., Протасов Ю.И., Некрасов С.С. и др [13, 17, 30, 54, 86]. На основе их исследований были разработаны современные методики расчётов параметров режущих инструментов и режимов работы исполнительных органов горных машин.

В работах академика Горячкина В.П. [17], для расчета общего сопротивления резанию рекомендовано использовать формулу (1.1):

$$P_p = G\mu_1 + \overline{A}_p bh + \varepsilon hbV^2, \quad (1.1)$$

где G – вес рабочего органа, Н;

\overline{A}_p – удельное сопротивление породы резанию, Н/м²;

b – ширина резания (ширина зуба), м;

b – ширина резания, м; h – глубина резания (толщина стружки), м;

ε – коэффициент, учитывающий сопротивление, возникающее при отбрасывании породы ($\varepsilon = 0,1\overline{A_p}$);

V – скорость подачи рабочего органа, м/с.

Формула Горячкина В.П. применяется для плугов с постоянной площадью сечения вырезаемой стружки и шириной резания $b \approx 1,5h$ и не может быть использована при расчете грейферных исполнительных органов в связи со значительным различием их конструкций и параметров работы.

Профессор Зеленин А.Н. опытным путем установил зависимость сопротивления резанию от ширины и глубины резания, угла резания, участия в процессе резания боковых стенок ковша, формы и расположения зубьев и ряда других факторов [30, 31].

Зеленин А.Н. вывел эмпирические формулы (1.2) – (1.4) для расчета силы сопротивления резанию P_p различными рабочими органами:

1) для отдельных зубьев (рыхлители):

$$P_p = 10Ch^{1,35}(1 + 0,5b) \left(1 - \frac{90^\circ - \delta}{180^\circ}\right) \beta_0 \mu T; \quad (1.2)$$

2) для отвалов (бульдозеры, автогрейдеры):

$$P_p = 10Ch^{1,35}(1 + 2,6l)(1 + 0,01\delta); \quad (1.3)$$

3) для ковшей с зубьями (экскаваторы):

$$P_p = 10Ch^{1,35}(1 + 2,6l)(1 + 0,075\delta)Z, \quad (1.4)$$

где C – экспериментально полученное число, характеризующее состояние и свойства породы (аналог $\overline{A_p}$);

l – длина режущей кромки рабочего органа, м;

T – коэффициент затупления ($T=0,85 \div 2$);

Z – коэффициент, учитывающий влияние зубьев;

h – величина заглубления, м.

Рассматривая механизмы разрушения углей резанием в исследованиях, проведенных Бероном А.И. [13], можно сделать вывод о схожести их физико-механических свойств с КМК. Наиболее распространенной методикой расчета

резания углей считается, предложенная ИГД им. А.А. Скочинского [86], в которой определение сопротивления резанию предлагается рассчитывать по выражению (1.5):

$$P_p = 10\overline{A}_p K_{OT} \frac{0,035b + 0,3}{b + E\sqrt{h}} ht K_3 K_y K_\phi K_C \frac{1}{\cos\beta}, \quad (1.5)$$

где K_{OT} – коэффициент отжима угля;

E – показатель степени хрупкости пласта;

t – шаг резания, мм;

K_3 – коэффициент обнажения забоя;

K_y – коэффициент влияния угла резания δ на удельную энергоёмкость резания угля;

K_ϕ – коэффициент влияния формы передней грани резца на удельную энергоёмкость резания;

K_C – коэффициент, учитывающий схему резания;

β – угол установки резца к направлению подачи.

Данная формула, к сожалению, не учитывает условия для первоначального внедрения в пласт и применима больше к барабанным (шнековым) или корончатым исполнительным органам.

Исследования проф. Ставрогина А.Н. [96] были направлены на выявления зависимости прочностных свойств породы от скорости деформации.

Рассматривая расчеты грейферных ковшей стоит выделить работы Стрекалова Б.Н., Таубера Б.А., Руклодельцева А.С., Севастьянова В.А. и др. [90, 91, 93, 97, 101]. При описании процесса захвата грейфером материала в данных работах выделяется две стадии: первая это начальное внедрение (заглубление) и вторая – зачерпывание груза. При этом подчеркивается отличие при захвате смерзшегося материала. В таком случае внедрение грейфера сопровождается перерезыванием смерзшейся корки и её сжатием при смыкании челюстей [20].

Расчет внедрения в смерзшуюся корку будет повторять внедрение в массив КМК, поэтому расчет таких грейферных ковшей наиболее применим к грейферному исполнительному органу глубоководного сборщика КМК.

Руководельцев А.С. [90], рассматривая способы применения виброактивного дебалансного грейферного ковша, предлагает рассчитывать первоначальную силу внедрения режущих элементов ковша по следующей формуле (1.6):

$$P_0 = k_k P_{0T} b l (1 + k_1 y^n) \exp(-k_2 (\frac{dA}{dl} + \frac{dA}{db})), \quad (1.6)$$

где P_0 – сила внедрения режущего элемента в пласт, Н;

k_k – коэффициент калибровки;

P_{0T} – удельное сопротивление внедрению, Н/м²;

k_1 – коэффициент интенсивности нарастания силы внедрения режущего элемента от глубины внедрения;

y – глубина внедрения режущего элемента, м;

n – коэффициент, учитывающий нелинейность зависимости силы внедрения режущего элемента от глубины внедрения;

k_2 – коэффициент, учитывающий интенсивность убывания удельного сопротивления внедрению режущего элемента при увеличении геометрических размеров l и b .

Также вводится понятие объема начального заглубления по формуле (1.7):

$$V_{\text{нач}} = 6,5 \cdot 10^{-8} \frac{G V_{\Pi}}{C}, \quad (1.7)$$

где $V_{\text{нач}}$ – объем начальной величины заглубления, м³;

V_{Π} – скорость подачи грейфера, м/с;

G – вес грейферного ковша, кг·м/с².

В работах Севастьянова В.А. [93] особое внимание уделено рассмотрению различных усилий, возникающих на ковше при внедрении, проходе смерзшейся корки, на границе корки и сыпучего материала, а также в сыпучем материале.

Величина начального заглубления Z находится из уравнения (1.8):

$$4,73(2n - 1) P_{0M} l t g \beta Z^{2,54} - m_{\text{гр}} g Z - \frac{m_{\text{гр}} V_{\Pi}^2}{2} = 0 \quad (1.8)$$

где $m_{\text{гр}}$ – масса грейфера, кг;

β – угол заострения, град.

Максимальная глубина внедрения, при которой возможно рыхление корки

предлагается рассчитывать по формуле (1.9):

$$Z_{max} = \frac{G}{\sigma_{сж}(2n - 1)l \left(\mu_1 + \frac{1}{i_n i_k \eta_c \eta_{ш}} \right)}, \quad (1.9)$$

где i_n – кратность полиспафта грейферного ковша;

i_k – кинематическое передаточное число грейферного механизма;

$\eta_{ш}, \eta_c$ – КПД шарниров и зубчатой передачи грейферного механизма.

Таким образом, для нашего случая необходимо провести дополнительные теоретические исследования параметров работы грейферного ковша в условиях глубоководной добычи КМК, опираясь на изыскания В.А. Севастьянова, определив усилия, возникающие на ковше в зависимости от толщины КМК и их удельной сопротивляемости внедрению.

1.4.1 Анализ методик расчета ударника

Для условий подводной добычи КМК с целью предварительного или дополнительного разрушения могут быть применены гидравлические ударники (гидроударники). Машины ударного действия превращают энергию ускорения поршня в полезную работу разрушения (ударный импульс) через породоразрушающий инструмент исполнительного органа (долото, бур и т.д.).

Процессы разрушения горной породы ударом исследовались многими учеными, среди которых Ушаков Ю.Н., Барон Л.Н., Веселов Г.М., Коняшин Ю.Г., Покровский И.С., Царицин В.В., Алимов О.Д., Иванов К.И., Подэрни Р.Ю., Каманин Ю.Н. и др.

Основным и главным параметром ударников является энергия удара $A_{уд}$, которая, по мнению Ушакова Ю.Н. [103], оценивается кинетической энергией поршня-ударника в момент его удара по породоразрушающему инструменту и определяется выражением (1.10):

$$A_{уд} = \frac{m_{п} V_{п}^2}{2}, \quad (1.10)$$

где $m_{п}$ – масса поршня-ударника, кг;

$V_{п}$ – скорость поршня-ударника в момент удара, м/с.

Чем выше значение переданной энергии от поршня к инструменту, тем

выше КПД машины и тем больше глубина внедрения инструмента, а соответственно и производительность системы. Поэтому важно знать факторы, влияющие на передачу ударного импульса.

Для оценки производительности ударной отбойки, т.е. величины заглубления в единицу времени, требуется знать параметры разрушаемого массива, а также режимные параметры самой ударной машины.

Барон Л.Н., Веселов Г.М. и Коняшин Ю.Г. [9] указывают, что глубина внедрения l инструмента при ударе прямо пропорциональна квадратному корню из энергии удара и предлагают рассчитывать по выражению (1.11) в зависимости от ряда параметров:

$$l = \sqrt{\frac{A_{y\partial}}{f'B(\operatorname{tg}(\theta/2))}}, \quad (1.11)$$

где $A_{y\partial}$ – энергия единичного удара, Дж;

B – длина режущей кромки, м;

θ – угол заострения коронки, град;

f' – удельное сопротивление породы внедрению, Н/м².

Покровский И.С. [85] выделил особенность механизма взаимодействия рабочего инструмента с массивом породы, взяв за основу тот факт, что даже новая пика имеет площадь так называемого затупления, которая увеличивается в процессе работы.

Царицын В.В. в своей работе [104] изучал вдавливание конусов в известняк. В результате исследований было выделено три последовательных этапа этого вдавливания: упругое перемещение породы, далее образование линий наибольших касательных напряжений и скалывание элементов горной породы в конце.

Согласно работам Барона Л.И. [9] скорость отбойки гидроударников при множественном ударе следует рассчитывать по энергетической формуле (1.12):

$$V_T = K \frac{A_{y\partial} n}{d} \sqrt{K_d}, \quad (1.12)$$

где K – эмпирический коэффициент, выбирается в зависимости от свойств горных

пород; V_T – механическая скорость отбойки, мм/мин; K_d – показатель дробимости, характеризующий сопротивляемость породы динамическому разрушению по методу дробимости.

Наиболее наглядно определять линейную скорость отбойки породы ударника предложили Алимов О.Д. и Иванов К.И. [2, 3, 32] по следующей формуле (1.13):

$$V = \frac{4A_{y\partial}F_{\text{ц}}}{\pi d^2 \sigma_{\text{сж}} (\text{tg}(\alpha/2) + \mu) K_{\text{зат}}}, \quad (1.13)$$

где $F_{\text{ц}}$ – частота ударов, с^{-1} ;

$\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности породы на сжатие, Н/м^2 ;

d – диаметр инструмента, м;

α – угол заточки, град;

μ – коэффициент трения инструмента с породой;

$K_{\text{зат}}$ – коэффициент затупления инструмента.

Глубина внедрения инструмента при совершении единичного удара по Подерни Р. Ю. определяется по формуле (1.14) [84]:

$$h_0 = \sqrt{\frac{A_{y\partial}}{d \sigma_{\text{сж}} (\text{tg}(\alpha/2) + \mu) K_{\text{зат}}}}, \quad (1.14)$$

Если требуется множество ударов, значение заглубления пики не может быть рассчитано как сумма всех величин её единичных заглублений по причине изменения грунта в момент каждого следующего удара. При данных условиях величина заглубления пики рассчитывается по следующей формуле (1.15):

$$h = h_0 \cdot n^\beta = \left(\sqrt{\frac{A_{y\partial}}{d \sigma_{\text{сж}} (\text{tg}(\alpha/2) + \mu) \cdot K_{\text{зат}}}} \right) n^\beta, \quad (1.15)$$

где n – количество ударов,

β – коэффициент влияния импульса, $\beta = 0,2 \div 0,6$.

Каманин Ю.Н. [35] вывел зависимость (1.16) объема скола от рациональных параметров ударной системы, которые обеспечивают минимальные удельные энергозатраты:

$$\begin{aligned}
H_w = & 11,1 \left(\frac{\sigma_2}{P_{\text{кд}}} \right)^2 + 3,4 \left(\frac{a_2}{h} \right)^2 + 0,2 \left(\frac{m_1}{m_2} \right)^2 - 8 \frac{\sigma_2}{P_{\text{кд}}} \varphi_2 + 3,3 \frac{\sigma_2}{P_{\text{кд}}} \frac{m_1}{m_2} - \\
& - 1,15 \frac{a_2}{h} \varphi_2 - 0,6 \frac{a_2}{h} \frac{m_1}{m_2} - 15,6 \frac{\sigma_2}{P_{\text{кд}}} - 8 \frac{a_2}{h} - 2,2 \frac{m_1}{m_2} - 9,6 \varphi_2 + 14,1
\end{aligned} \tag{1.16}$$

при выполнении следующих соотношений (1.17):

$$2,5 < \frac{m_1}{m_2} < 4; 0,3 < \frac{\sigma_2}{P_{\text{кд}}} < 0,55; \frac{a_2}{h} = 0,8; \varphi_2 = 0,9 \tag{1.17}$$

где a_2 – длина режущей кромки, м;

h – величина заглабления, м;

φ_2 – угол заострения инструмента, град;

m_1 и m_2 – массы поршня-ударника и инструмента соответственно, кг;

σ_2 – максимальное напряжение в инструменте, Н/м²;

$P_{\text{кд}}$ – контактное динамическое давление, Па.

Выражения (1.13) - (1.17) следует использовать при дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях встроенного ударника сборщика КМК для определения его рациональных параметров.

1.5 Выводы по главе 1

1. Основными подводными ТПИ являются ЖМК, КМК и ГПС, причем самыми ценными являются КМК, которые содержат в себе комплекс редких элементов, в том числе востребованного и дорогостоящего уже сегодня кобальта. Богатые месторождения КМК на участках Магеллановых гор закреплены за Российской Федерацией и начало их разработки зависит только от момента окончательной разработки технологии и технических средств добычи.

2. Известные технические средства для добычи подводных ископаемых выполняют главным образом две функции: отделение от массива дна и перемещение в точку сбора. В некоторых случаях есть также частичное обогащение. Для выемки КМК наиболее продуктивной технологией является избирательное разрушение на глубину всего рудного слоя, отделение ПИ от субстрата и экскавация его в накопительный бункер. Существующие технологии и средства для добычи КМК не являются достаточно эффективными и

производительными и не отвечают современным требованиям безопасности, энергоэффективности, а главное - экологичности.

3. Параметрический анализ технических средств и их исполнительных органов показал, что наиболее перспективным является добычный комплекс, в состав которого входит самоходный шагающий сборщик с возможностью замены исполнительных органов. Для разработки однородных КМК, с учетом условий их залегания, использование шагающего сборщика возможно, установив на его манипуляторах грейферные ковши. Для обеспечения функции предварительного разрушения (дробления) дополнительно следует оснастить сборщик скалывающим элементом, размещение и тип которого следует обосновать теоретическими и экспериментальными исследованиями.

4. Существующие методики расчета грейферных ковшей описывают работу в условиях свободного черпания и в основном не подразумевают работу ковша в условиях черпания однородного сплошного массива. Однако наиболее близкими для расчета сбора КМК будут являться методики, предложенные В. А. Севастьяновым, которые рассматривают случай черпания материала с отвердевшей коркой под действием отрицательных температур.

5. Известные методы расчета машин ударного действия по-разному описывают объем и скорость их отбойки. Для теоретической оценки возможности использования ударника в качестве отдельного агрегата или в совокупности с исполнительным органом следует рассматривать методики определения глубины внедрения и удельной энергоемкости отбойки руды, предложенные Подэрни Р.Ю. и Ивановым К.И.

Цель диссертационной 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.

Основные задачи исследования:

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 перемещения кобальтоносных железомарганцевых корок при различных условиях залегания и разработать алгоритм расчета производительности добычного комплекса.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КМК РЕЗАНИЕМ И УДАРОМ ГРЕЙФЕРНЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ОРГАНОМ ПОДВОДНОГО СБОРЩИКА

В соответствии с ранее поставленной целью основными задачами теоретических исследований являются:

- определение рациональной компоновочной схемы глубоководного сборщика с грейферным исполнительным органом и скалывающим элементом;
- обоснование рациональных параметров грейферного исполнительного органа на основании физико-механических свойств КМК;
- исследование нагрузок на режущих элементах грейферного исполнительного органа при разрушении массива резанием для различных условий залегания КМК;
- исследование зависимостей параметров ударника и породоразрушающего инструмента при разрушении массива КМК ударом;
- обоснование необходимости использования комбинированной схемы сбора КМК, совмещающей резание и удар;
- определение методики расчета добычного комплекса, включающего глубоководный сборщик с грейферным исполнительным органом со скалывающим элементом;
- определение задач экспериментальных исследований процесса разрушения КМК резанием и ударом и требований к экспериментальным стендам.

2.1 Определение компоновочной схемы и параметров устройства для добычи КМК

Как было обосновано в первой главе, наиболее подходящим устройством для сбора КМК может быть шагающий сборщик с грейферным исполнительным органом и ударником, компоновочная схема которого представлена на рисунке 2.1.

Работа такого сборщика осуществляется следующим образом. Сборщик 1 опускается с судна обеспечения кабель-тросом специальной конструкции 2 на океаническое дно. Перемещение, закрепление на склонах, а также сбор полезного

ископаемого осуществляется грейферным исполнительным органом 4, закрепленным на манипуляторах 3. В случае, показанном на рисунке 2.1, предварительное разрушение КМК происходит ударником на манипуляторе 6, а сбор грейфером 5. Массив КМК представляет собой подложку (субстрат) 8, на которую напластована рудная часть (полезный компонент) 7. Вместимость ковша, из расчета рационального черпания, должна соотноситься с мощностью (толщиной) слоя КМК (5–40 см) таким образом, чтобы обрабатывать весь слой за одно черпание.

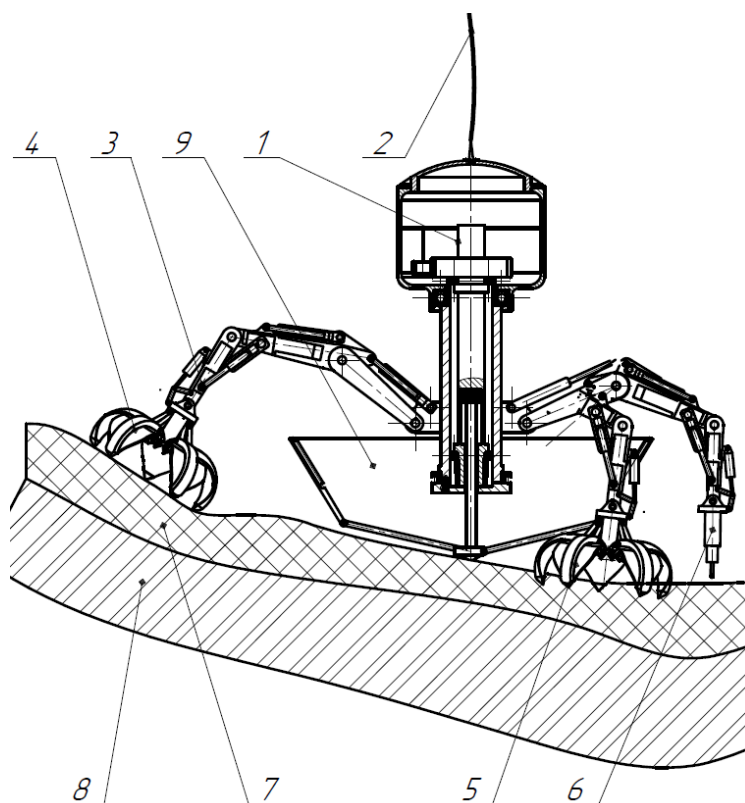


Рисунок 2.1 – Компоновочная схема глубоководного сборщика КМК [111, 119]

Расчет такой компоновочной схемы может складываться из следующих параметров:

- 1) требуемая энергия удара для внедрения и/или откола КМК, по которой устанавливается рабочее давление в контуре гидравлической системы ударника и параметры элементов ударной системы;
- 2) суммарный момент сопротивления смыканию челюстей ковша, по которому подбирается усилия подачи ковша и закрытия челюстей;
- 3) геометрические параметры грейферного ковша;

- 4) геометрические параметры породоразрушающих инструментов (режущих элементов ковша и пики ударника);
- 5) временные затраты на разрушение одного участка для зачерпывания;
- 6) временные затраты на сбор разрушенного материала;
- 7) время цикла с момента одного сбора до готовности к следующему сбору;
- 8) производительность сбора, которую может осуществить сборщик независимо от транспортной системы.

Стоит отметить, что представленная выше схема имеет существенный недостаток в виде дополнительного манипулятора с ударником, что значительно усложняет конструкцию, а в условиях подводной добычи, управление таким агрегатом становится более трудоемким.

Поэтому стоит рассматривать схемы компоновки исполнительного органа, которые подразумевают совместное исполнение ударных и режущих элементов. При учете того, что КМК имеют не настолько высокую крепость, для которой требуется отдельный гидромолот, использование компактных ударников в грейферном ковше становится более адекватным.

Для определения параметров ударника и самого грейферного исполнительного органа, следует определить конкретные физико-механические свойства, имеющихся образцов КМК и рассмотреть возможные схемы сбора различными вариантами исполнительных органов.

2.2 Теоретическое исследование физико-механических свойств КМК

Характер разрушения горных пород, включая КМК, зависит от различных факторов:

- 1) геометрических параметров инструмента;
- 2) физико-механических свойств горной породы;
- 3) динамичности нагружения горной породы инструментом.

В зависимости от динамичности прикладываемой нагрузки различают:

- статическое нагружение, при котором процесс происходит медленно без учета сил инерции (резание);
- квазистатическое нагружение, при котором процесс происходит быстро,

но также без учета сил инерции (удар);

- импульсное нагружение – процессы, описываемые уравнениями механики сплошной среды с учетом сил инерции [3].

С расчетной точки зрения разрушение материалов принято разделять на хрупкое и пластическое [2, 9, 88].

Известные физико-механические свойства КМК [133], представленные в таблице 2.1, показывают, что имеется большая вариативность, в том числе и по крепости, поэтому, при выемке КМК возможны следующие варианты взаимодействия с массивом, отвечающие разрушению резанием: внедрение; рыхление; копанье (черпание).

Таблица 2.1 - Основные физико-механические свойства КМК

Свойства	КМК	Подложка
Плотность, г/см ³	1,65-2,17	1,44-2,92
Пористость, %	43-74	7-69
Скорость распространения волны, м/с	2090-3390	1760-5860
Прочность на сжатие, МПа	0,5-16,8	0,1-68,2
Прочность на растяжение, МПа	0,1-2,3	0,01-18,90

Для более справедливых теоретических и экспериментальных исследований необходимо произвести уточнение свойств, имеющихся образцов КМК. Для этого использовался расчетный метод определения физико-механических свойств по экспериментально полученным параметрам на установке в сертифицированной лаборатории СПГУ [41, 42, 121, 126] с построением паспорта прочности КМК в трех состояниях: имеющемся (влажность 20 %), водонасыщенном, воздушно-сухом.

Сущность метода (по классическому способу) заключается в наложении двухстороннего осевого усилия сферическими шариками (инденторами) на образцы до разрушения, произведенного после предельного значения осевого усилия (разрушающая сила), которое фиксируется. В момент раскола в образце происходят различные механизмы разрушения: «квазипластическое» - непосредственно в месте контакта с инденторами; отрыв и срез – на границах зон

разрушения.

Полученные, в ходе испытаний, физико-механические свойства имеющихся образцов КМК, представлены в таблице 2.2.

Дальнейшее исследование образцов заключается в измерении площадей скола и области сжатия (отпечатка) от шарика. По измеренным параметрам, расчетным методом, находятся требуемые значения для построения паспорта прочности породы (КМК) (рисунок 2.2), который представляет собой графическое изображение прочностных характеристик КМК в виде характерных точек, огибающих круги Мора. Радиусы кругов Мора представляют собой предельные значения напряжений, соответствующие устойчивым видам разрушения.

Таблица 2.2 – Полученные физико-механические свойства имеющихся образцов КМК

Полученные параметры	Состояние КМК		
	Воздушно-сухое	Нормальные условия (влажность 20 %)	Водонасыщенное
Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	0,82	0,86	0,78
Предел прочности при сжатии σ_c , МПа	5,40	5,87	5,83
Предел прочности при срезе (сцепление) C_0 , МПа	1,35	1,45	1,02
Коэффициент хрупкости $K_{хр}$	6,50	6,70	7,45
Коэффициент трения КМК по стали, μ_1	0,35	0,32	0,28
Максимальное сопротивление срезу τ_{max} , МПа	8,60	9,42	10,14

По полученным данным, можно сделать следующие выводы:

- полученные значения отвечают известным пределам физико-механических свойств КМК, что говорит о правильности метода исследования;

- зависимости роста всех показателей с увеличением влагонасыщения образцов присутствуют, но значение параметров при разных состояниях КМК отличается незначительно, что позволяет судить о том, что свойства исследуемых образцов КМК во влажных условиях практически не меняются по сравнению с сухими, поэтому полученные в дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях данные для образцов в нормальных условиях могут быть

справедливы для КМК, находящихся в природных условиях залегания на дне океана.

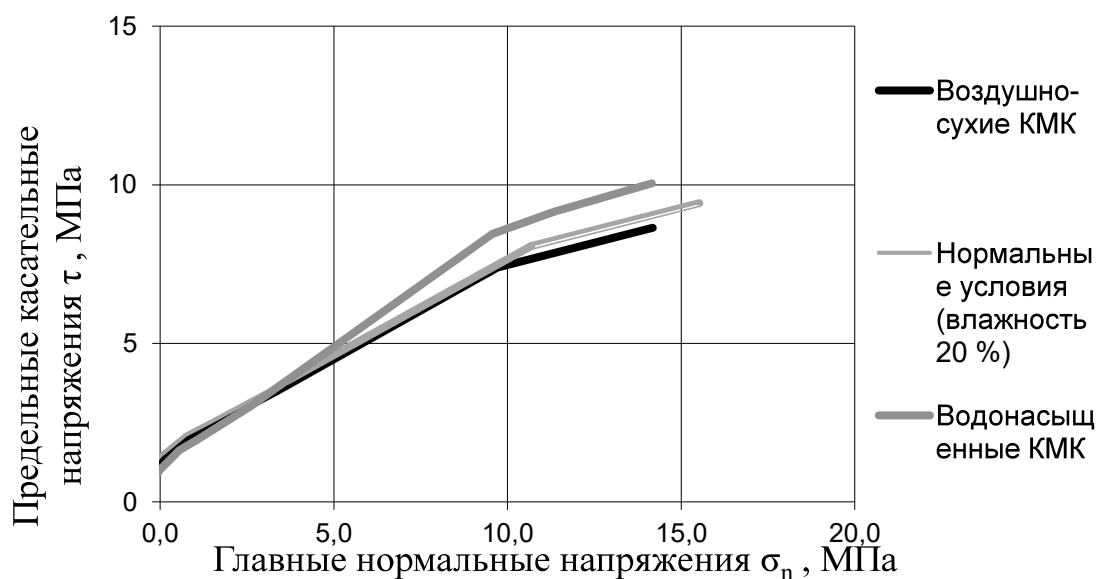


Рисунок 2.2 - Паспорт прочности КМК для трех состояний

Для определения конкретного типа грейферного ковша, были проанализированы их возможности с требуемыми функциями, которые должен реализовать выбранный грейфер (таблица 2.3).

Таблица 2.3 - Оценка возможностей различных типов грейферных ковшей

Реализация требуемых функций	Канатный двухчелюстной грейферный ковш	Гидравлический двухчелюстной грейферный ковш	Гидравлический многочелюстной грейферный ковш
Опираие на почву	-	-	+
Подводная добыча	-	+	+
Внедрение	+/-	+/-	+
Регулируемое внедрение	-	+	+
Резание	+	+	+
Рыхление	-	+/-	+
Копание (черпание)	+	+	+
Реализация ударных функций	+/-	+/-	+

Наиболее предпочтительным, по выполнению всех функций будет гидравлический многочелюстной грейфер с ковшом закрытого типа для жидко-сыпучих материалов (рисунок 2.3).

Данный ковш жестко закреплен на манипуляторе сборщика, поворачивается вокруг своей оси и имеет возможность регулируемого управления каждой лопастью, оснащенной собственным гидроцилиндром. Внедрение в КМК,

опирание на почву и закрепление на склонах будет происходить непосредственно режущими элементами (РЭ) ковша.



Рисунок 2.3 – Гидравлический пятичелюстной грейферный ковш закрытого типа

2.3 Теоретическое исследование процесса разрушения КМК резанием

Внедрение в однородный массив ПИ ковшового исполнительного органа, чаще всего сопровождается уплотнением минеральных зерен, приводя их в напряженное состояние с последующим разрушением после достижения предельного напряженного состояния по плоскостям деформации в зависимости от свойств породы [30]. В начальный момент заглужения, как правило, составляющая хрупкого разрушения преобладает, в то время как с увеличением глубины внедрения разрушение происходит с увеличением пластической деформации и в зависимости от параметров инструмента данный процесс будет происходить с разной интенсивностью [17, 20, 31, 90, 93].

Считается, что воздействие инструмента на разрушаемую породу передается через уплотненное ядро [54, 85, 86, 98] - совокупность мелкораздробленной породной массы от внедрения передней грани инструмента, находящейся в условиях объемного сжатия (рисунок 2.4, а). Дальнейшее воздействие ядра уплотнения на массив разрушения происходит с циклически повторяющимися элементарными сколами и в зависимости от хрупкости породы количество сколов может изменяться и иметь непостоянный характер. Таким образом ядро уплотнения способствует разрушению массива, но в процессе работы негативно сказывается на инструменте – притупляя его.

Анализируя известные и полученные физико-механические свойства КМК можно предположить следующие варианты формирования скола:

- отдельными частями напластованием (рисунок 2.4, б) - клин, перемещаясь с силой P_n , оказывает давление на материал передней плоскостью и преодолев предельное сопротивление материала сжатию $\sigma_{сж}$, осуществляет сдвиг слоя материала под некоторым углом ψ_c ;
- с образованием стружки по определенной длине (рисунок 2.4, в);
- откалывание кусками произвольной формы вдоль линий трещиноватости (рисунок 2.4, г).

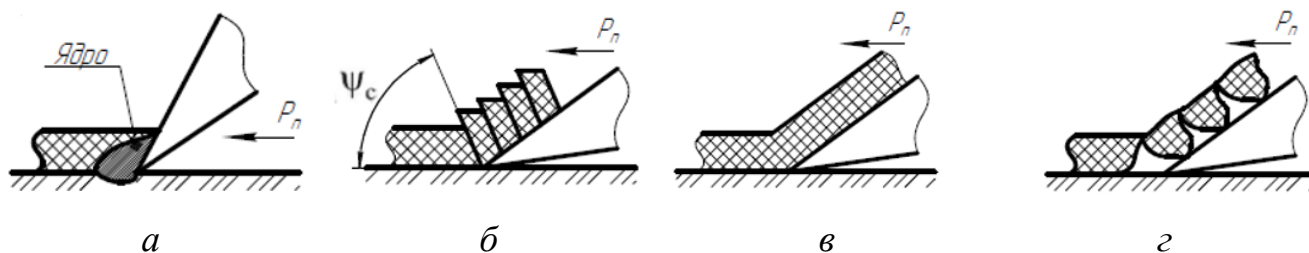


Рисунок 2.4 - Схема работы клина при формировании стружки КМК

Считается, что наименее энергоемкими схемами резания пород являются в и г, так как в них процесс резания представляет собой непрерывное чередование элементарных сколов с последующим отрывом крупного куска и образованием трещин разрушения в массиве, что приводит к падению силы резания [9, 13, 17, 20, 83, 104].

Во время резания со стороны материала действуют сила сопротивления резанию, которая складывается из нормальной реакции N , действующей на переднюю грань рабочего органа, силы трения $F_{тр}$ ($F_{тр} = \mu \cdot N$) и реакции R от ПИ на режущей кромке (рисунок 2.5).

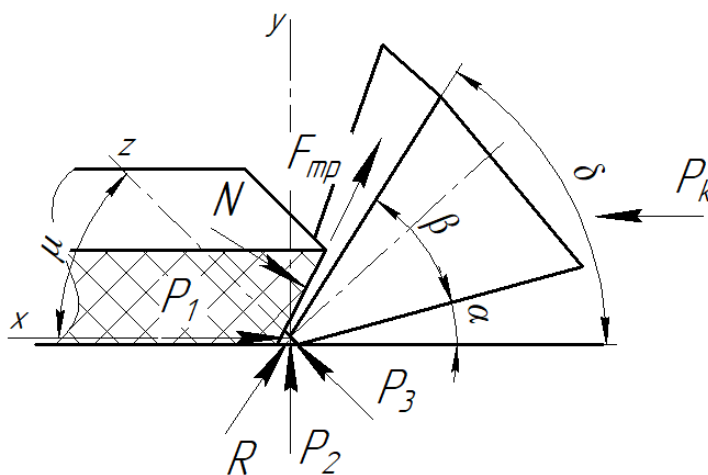


Рисунок 2.5 - Схема действия сил на клин ковша при резании КМК

Реакция R в свою очередь, раскладывается на составляющие: P_1 – касательная сила, всегда направлена в сторону, противоположную движению рабочего органа; P_2 – нормальная сила, может быть направлена вверх или вниз и зависит от реакции грунта как на переднюю грань, так и на режущую кромку; P_3 – боковая составляющая, в том случае, когда угол захвата φ меньше 90° , т.е. при косом резании. Параметры инструмента: угол резания (рыхления) – δ_0 ; угол заострения клина β ; задний угол α .

Классические виды РЭ грейферных ковшей, представлены на рисунке 2.6.

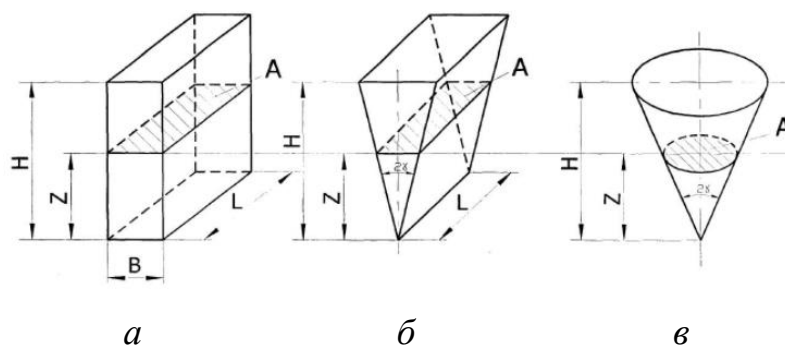


Рисунок 2.6 - Режущие элементы (РЕ):

a - прямоугольной формы; *б* - клиновидной формы; *в* - конусной формы

В работах Зеленина А.Н. [31] на основании теоретических и экспериментальных исследований грейферных ковшей утверждается:

- внедрение прямоугольных РЕ в твердую поверхность сопровождается первоначальным скачком сопротивления и происходит после превышения силы внедрения некоторого критического значения и с увеличением глубины внедрения прямолинейно возрастает;

- внедрение конусных и клиновидных РЕ в твердую поверхность происходит после превышения силы внедрения некоторого критического значения, без первоначального скачка сопротивления и с увеличением глубины внедрения, экспоненциально возрастает.

Известна математическая модель (ММ) (2.1), описывающая зависимость сопротивления внедрению от параметров прямоугольного РЕ [91]:

$$F_{\text{вн}} = k\sigma_{\text{вн}}S(1 + k_1h^n)\exp(-k_2(l + b)), \quad (2.1)$$

где $F_{\text{вн}}$ – сопротивление внедрению РЕ, Н;

$\sigma_{\text{вн}}$ – удельное сопротивление внедрению, Па;

k – коэффициент калибровки, учитывающий влияние формы РЭ;

S – площадь РЭ, м²;

k_1 – коэффициент интенсивности нарастания силы внедрения режущего элемента от глубины внедрения;

h – глубина внедрения режущего элемента, м;

n – коэффициент учитывающий нелинейность зависимости силы внедрения режущего элемента от глубины внедрения; l и b – длина и ширина РЭ, м;

k_2 – коэффициент, учитывающий интенсивность убывания удельного сопротивления внедрению режущего элемента при увеличении геометрических размеров l и b .

Для представления ММ РЭ конусной и клиновой форм следует использовать выражения (2.2) и (2.3), описывающие площади их поперечного сечения [91]:

$$S_{\text{кл}} = 2hltg\beta, \quad (2.2)$$

$$S_{\text{кн}} = \pi h^2 \cdot tg^2\beta \quad (2.3)$$

где β – угол заострения РЭ.

Тогда ММ для РЭ клиновой и конусной формы примет вид выражений (24) и (2.5) соответственно:

$$F_{\text{вн}} = 2\sigma_{\text{вн}}k_{\text{кл}}lh^{n_{\text{кл}}+1}tg\beta \quad (2.4)$$

$$F_{\text{вн}} = \sigma_{\text{вн}}k_{\text{кн}}h^{n_{\text{кн}}+2}\pi tg^2\beta \quad (2.5)$$

Графическое изображение выражений (2.1), (2.4) и (2.5) (рисунок 2.7) показывает нецелесообразность использования РЭ прямоугольной формы из-за большего значения первоначального сопротивления внедрению. Также из-за скорости нарастания сопротивления внедрению, связанные с формой поперечного сечения, конусные РЭ выгодно использовать до некой глубины внедрения $h_{\text{кр}}$ ($h < h_{\text{кр}}$), после преодоления которой ($h > h_{\text{кр}}$) эффективнее становятся клиновые РЭ (рисунок 2.7) [91].

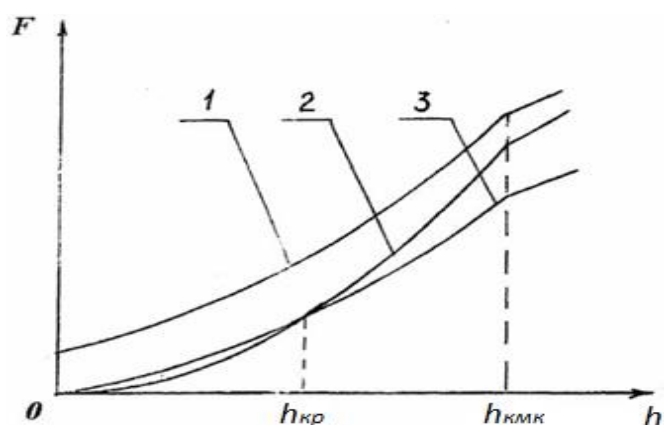


Рисунок 2.7 - Зависимость сопротивления внедрению в ПИ от глубины внедрения РЭ:

1 – прямоугольных; 2 – конусных; 3 - клиновых [93]

Для определения предела эффективности конусных РЭ и определения параметра $h_{кр}$ приравняем правые части зависимостей (2.4) и (2.5), получив выражение (2.6):

$$2\sigma_{вн} k_{кл} h^{n_{кл}+1} l t g \beta = \sigma_{вн} k_{кн} h^{n_{кн}+2} \pi t g^2 \beta \quad (2.6)$$

Приняв $h=h_{кр}$ получим выражение (2.7):

$$\frac{l}{t g \beta} = 1,57 \frac{k_{кн}}{k_{кл}} h_{кр}^{(n_{кн}-n_{кл}-1)} \quad (2.7)$$

Откуда, выразив $h_{кр}$, получим (2.8):

$$h_{кр} = \left(\frac{l k_{кл}}{1,57 k_{кн} t g \beta} \right)^{\frac{1}{n_{кн}-n_{кл}+1}} \quad (2.8)$$

Приняв коэффициенты калибровки, учитывающие влияние клиновой и конусной формы РЭ: $k_{кл} = 6,01$; $k_{кн} = 4,37$; $n_{кн} = 0,27$; $n_{кл} = 0,54$ [93] и задавшись условием $h_{кр} < h_k$, получим условие (2.9) для эффективного использования клинового РЭ при внедрении в КМК:

$$h_{кр} = 0,833 \left(\frac{l}{t g \beta} \right)^{1,37} < h_k, \quad (2.9)$$

где h_k – мощность рудной части КМК, м.

Для определения оптимальных параметров: угла заострения клина β и длины режущей кромки l , при которых целесообразно использовать клиновые РЭ построим графики зависимости $h_{кр}$ от длины режущей кромки клинового РЭ, при различных углах заострения (рисунок 2.8).

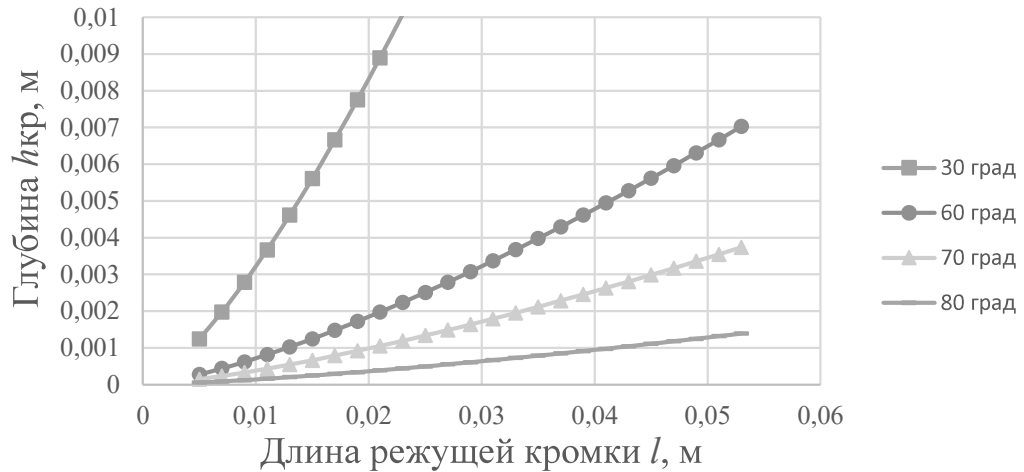


Рисунок 2.8 – Зависимость значения $h_{кр}$ от длины режущей кромки l при изменении угла заострения клина β

Анализ графика показал, что для соблюдения условия, рациональные параметры длины режущей кромки при угле заострения 30 градусов находятся в пределах до 0,025 м; при угле заострения 60 градусов находятся в пределах до 0,07 м. Значения рациональной длины режущей кромки при углах заострения меньше 30 и больше 60 градусов не дают однозначных выводов.

Окончательные значения рациональных параметров β и l следует определять в результате экспериментальных исследований РЭ клиновидной формы для образцов КМК с определением удельной сопротивляемости внедрению.

2.3.1 Усилия, возникающие на грейферном исполнительном органе при начальном внедрении в КМК

Определяя усилия, возникающие на РЭ грейферного ковша, следует рассматривать варианты схем его работы, применимых к сбору КМК, представляющие собой однородный массив с различными прочностными свойствами.

При благоприятных условиях КМК представляют собой хрупкий податливый массив, схема сбора которого будет стандартной – черпание с места стояния. Для случаев, когда КМК находятся в более твердом состоянии, рекомендуется учитывать, так называемое первоначальное внедрение в однородный массив, при котором грейферный исполнительный орган будет

испытывать максимальные нагрузки [20]. Исходя из этого, на рисунке 2.9 представлены две схемы сбора КМК стандартным грейферным ковшом:

- черпание хрупких и податливых КМК, при которой сила сопротивления внедрению постоянна (рисунок 2.9, а);

- черпание однородных КМК, при которых сила сопротивления внедрению сначала растет, а затем уменьшается после нарушения сплошности массива и смыкания челюстей (рисунок 2.9, б).

Для второго варианта (рисунок 2.9, б) расчет будет иметь нестандартный характер, так как КМК находятся в виде однородного массива и для первоначального внедрения потребуется некоторое усилие, которое будет отличаться от сопротивления закрытия ковша. Специфика рассматриваемого случая определяется характером зависимости сопротивления внедрению челюстей грейфера от глубины внедрения.

Спроектируем на вертикальную ось z все силы, действующие на грейфер при начальном заглублении, и получим равенство (2.10):

$$m_{\text{гр}} a_{\text{гр}} = G_{\text{гр}}^{\text{А}} - F_{\text{вн}}, \quad (2.10)$$

где $m_{\text{гр}}$ – масса грейфера, кг;

$a_{\text{гр}}$ – ускорение грейфера, м/с²;

$G_{\text{гр}}^{\text{А}}$ – вес грейфера с учетом выталкивающей силы Архимеда, $G_{\text{гр}}^{\text{А}} = m_{\text{гр}} g k_{\text{А}}$, Н;

$F_{\text{вн}}$ – сила сопротивления внедрению, Н;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$k_{\text{А}}$ – коэффициент действия силы Архимеда.

Коэффициент действия силы Архимеда для стальных изделий определяется из известного выражения (2.11):

$$k_{\text{А}} = 1 - \frac{\rho_{\text{ж}} V_{\text{тел}}}{m_{\text{гр}}} = 1 - \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{мат}}} = 0,87 \quad (2.11)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность воды, $\rho_{\text{ж}} = 1030$ кг/м³;

$V_{\text{тел}}$ – объем погруженного тела, $V_{\text{тел}} = m_{\text{гр}} / \rho_{\text{мат}}$, м³;

$\rho_{\text{мат}}$ – плотность материала, из которого изготовлен грейфер, кг/м³.

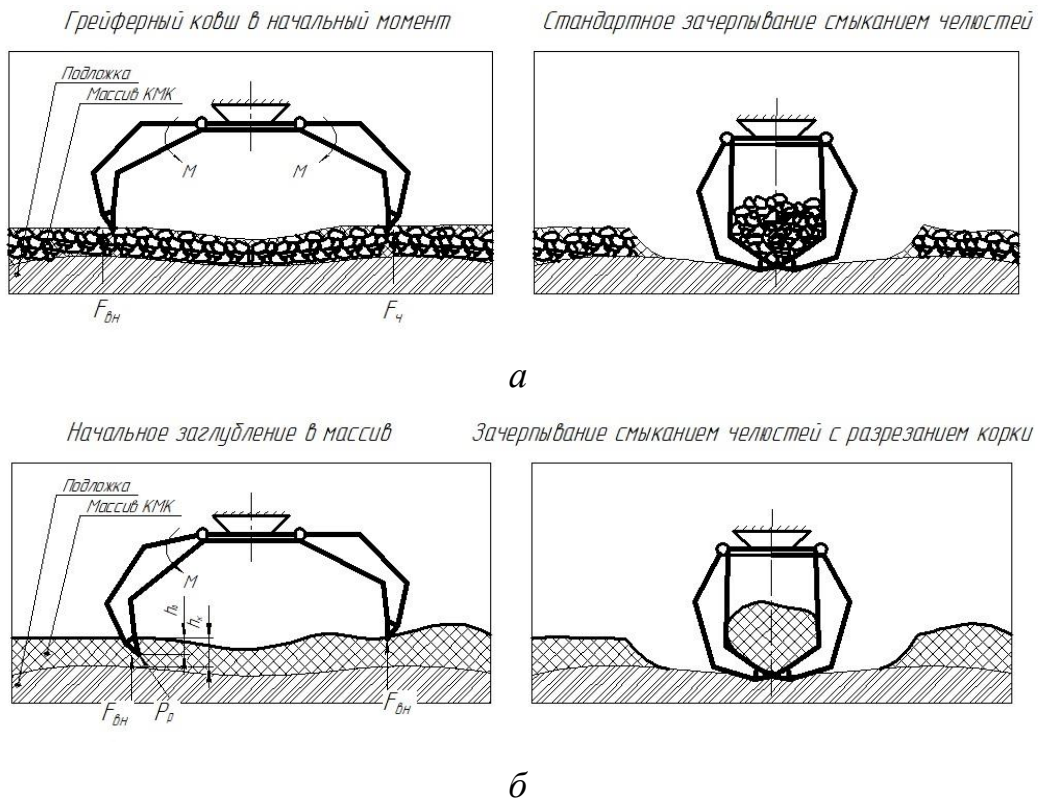


Рисунок 2.9 - Схемы работы стандартного грейферного ковша при черпании КМК:

а - мягкие КМК; б - хрупкие однородные КМК

Подставим значение сопротивления внедрению из уравнения (2.4) [93] для начального заглубления ($0 < h_0 \leq h_k$) и запишем уравнение (2.10) в дифференциальной форме (2.12) и (2.13):

$$m_{\text{гр}} \frac{d^2 h}{dt^2} = m_{\text{гр}} g k_A - 2\sigma_{\text{вн}} k l h_0^{n+1} t g \beta, \quad (2.12)$$

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = g k_A - \frac{2\sigma_{\text{вн}} k l t g \beta}{m_{\text{гр}}} h_{0\text{вн}}^{n+1} \quad (2.13)$$

где h_0 – величина начального заглубления.

Рассмотрим уравнение (2.13) - нелинейное второго порядка, не содержащее явного аргумента. Воспользуемся соотношением (2.14):

$$\left(\dot{h}_0^2 \right)' = 2\dot{h}_0 \ddot{h}_0. \quad (2.14)$$

Тогда выражение (2.13) преобразуется в (2.15):

$$\left(\dot{h}_0^2 \right)' = 2\dot{h}_0 \left(g k_A - \frac{2\sigma_{\text{вн}} k l t g \beta}{m_{\text{гр}}} \cdot h_{0\text{вн}}^{n+1} \right). \quad (2.15)$$

После интегрирования получим значение первой производной величины

заглубления (2.16):

$$\dot{h}_0 = \sqrt{2gk_A h_{0ВН} - 2 \frac{2\sigma_{ВН} k l t g \beta}{m_{Гр}} \cdot \frac{h_{0ВН}^{n+2}}{n+2} + C_1}. \quad (2.16)$$

При условии $h_0 = 0$, константа C_1 определяется условиями (2.17):

$$\dot{h}_0 = \sqrt{C_1} = V_0; \quad C_1 = V_0^2, \quad (2.17)$$

где V_0 – скорость начального внедрения челюсти, м/с.

Тогда выражение (2.16) примет вид (2.18):

$$\dot{h}_0 = \sqrt{2 \left(m_{Гр} g k_A h_{0ВН} - \frac{2\sigma_{ВН} k l t g \beta}{n+2} h_{0ВН}^{n+2} + \frac{m_{Гр} V_0^2}{2} \right)}. \quad (2.18)$$

Так как в момент максимального первоначального заглубления действуют максимальные нагрузки и происходит остановка ковша, то $\dot{h}_0 = V_0 = 0$. Полученное выражение (2.19) можно использовать для определения максимальной величины первоначального внедрения h_{max} РЭ челюстей грейфера в КМК:

$$\frac{2\sigma_{ВН} k l t g \beta}{n+2} h_{max}^{n+2} - m_{Гр} g k_A h_{max} = 0 \quad (2.19)$$

Подставив значения коэффициентов формы РЭ в выражение (2.19), получим эмпирическую зависимость для определения глубины начального внедрения (2.20):

$$h_{0ВН} = \sqrt[0,54]{\frac{m_{Гр} g k_A}{4,73\sigma_{ВН} l t g \beta}} \quad (2.20)$$

Подставив значения коэффициента действия силы Архимеда (2.11) и значение скорости свободного падения, выражение (2.19) можно представить в виде системы уравнений (2.21), решаемую графическим способом:

$$\begin{cases} f_1(h_{0ВН}) = \sigma_{ВН} h_{0ВН}^{1,54} l t g \beta \\ f_2(h_{0ВН}) = 1,8 h_{0ВН} m_{Гр} \end{cases} \quad (2.21)$$

Приняв предварительные рациональные параметры длины режущей кромки, угла заострения, удельного сопротивления внедрению и массы грейферного ковша, построим графики функций системы уравнений, точка их пересечения

будет являться максимальной глубиной начального внедрения (рисунок 2.10).

Значения выбранных параметров и полученных с ними величины первоначального заглубления сведены в таблицу 2.4.

Сравнение полученных значений говорит о том, что изменение удельного сопротивления внедрению приводит к меньшему влиянию на величину первоначального заглубления, в отличие от изменения длины режущей кромки, а увеличение массы грейферного ковша значительно увеличивает величину начального заглубления, но в условиях подводной добычи масса сборщика является параметром критическим и будет подвергаться уменьшению при конструкторских разработках.

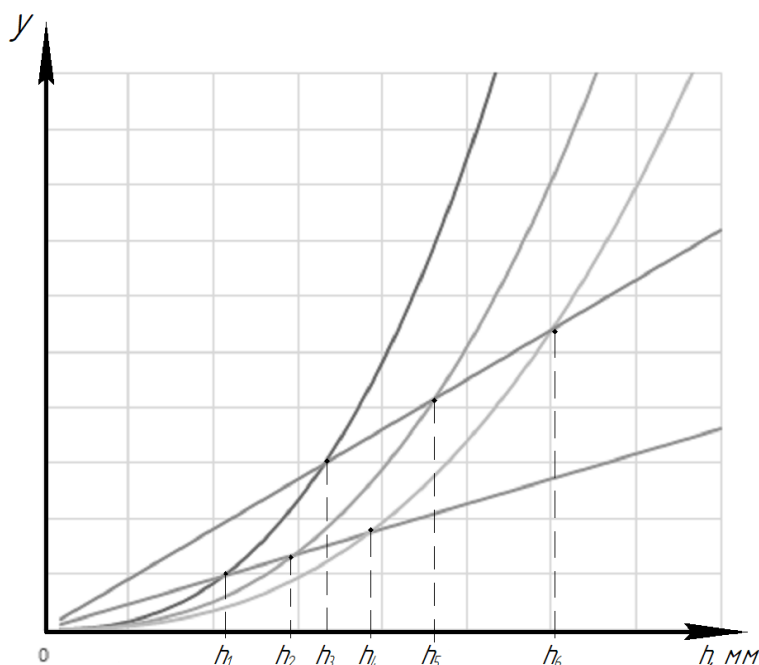


Рисунок 2.10 - Графическое решение системы уравнений (2.21)

Таблица 2.4 – Значения выбранных и полученных параметров при графическом решении системы уравнений (2.21)

Масса ковша, кг	Угол заострения, град	Удельное сопротивление внедрению, МПа	Длина режущей кромки, м	Величина начального заглубления, мм
500	30	2	0,025	$h_1=11$
500	30	2	0,015	$h_2=14$
1000	30	2	0,025	$h_3=17$
500	30	1	0,02	$h_4=19$
1000	30	2	0,015	$h_5=23$
1000	30	1	0,02	$h_6=30,5$

Таким образом, для окончательного расчета усилий на грейферном исполнительном органе при разрушении КМК резанием требуется экспериментально установить удельное сопротивление внедрению в КМК $\sigma_{вн}$ и рациональные параметры массы ковша, длины и угла заострения РЭ.

2.3.2 Усилия на грейферном исполнительном органе при смыкании челюстей

После завершения заглабления и нарушения сплошности массива КМК необходимо рассчитывать усилия сопротивления зачерпыванию, возникающие при смыкании челюстей грейфера. Для этого проверим условие (2.22) смыкания челюстей грейфера:

$$F_{ч} = \frac{M_p}{A} > P_{п}, \quad (2.22)$$

где $F_{ч}$ – удельная сила сопротивления смыканию челюсти, Н/м;

A – режущая площадь РЭ, м²;

M_p – момент от сопротивления резанию, Нм;

$P_{п}$ – наименьшая удельная нагрузка на режущей площади РЭ челюсти, Н/м.

В процессе смыкания челюстей, КМК следует рассматривать как материал, содержащий куски различной формы, который подвергается сжатию, перемешиванию и уплотнению между смыкающимися челюстями.

Тогда момент от сопротивления резанию вычисляется по формуле (2.23):

$$M_p = P_p H, \quad (2.23)$$

где P_p – усилие резания, возникающее в процессе смыкания челюстей, Н;

H – высота от РЭ до точки вращения челюсти (плечо), м.

После внедрения в КМК начинается процесс смыкания челюстей, сопровождаемый резанием (рыхлением) КМК и зачерпыванием разрыхленного материала. Рассмотрим начальный момент захвата, сжатия и разрушения КМК челюстями при условии (2.24) резания КМК одной челюстью:

$$P_{г} - G_{гп}^A - F_{тр} = 0, \quad (2.24)$$

где $P_{г}$ – усилие на штоке гидроцилиндра, Н;

$F_{тр}$ – сила трения, обусловленная действием силы сжатия $F_{сж}$ КМК челюстями,

$F_{тр} = F_{сж}\mu$.

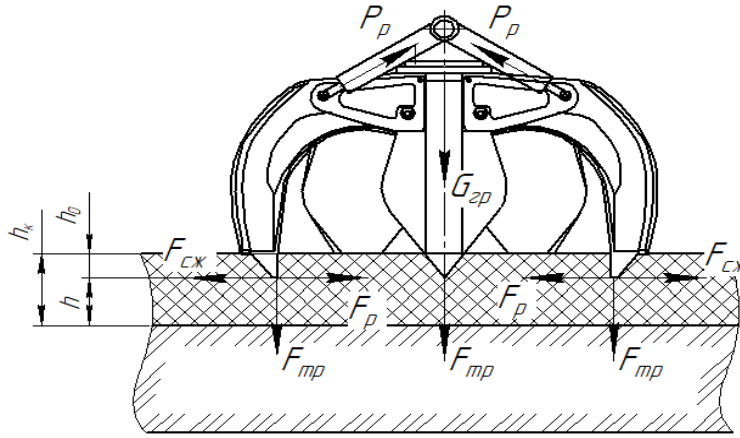


Рисунок 2.11 – Схема приложения сил на челюсти грейфера при зачерпывании КМК

Из теории резания мерзлых грунтов [20] сила сжатия в общем виде может быть представлена выражением (2.25):

$$F_{сж} = \sigma_{сж} h \sum_{i=1}^n l_i. \quad (2.25)$$

где $\sigma_{сж}$ – сопротивление материала одноосному сжатию, МПа;

l_i – длина режущей кромки, м.

Для преодоления силы сопротивления резанию, необходимо, чтобы гидроцилиндр обеспечил такое же усилие смыкания челюстей, поэтому справедливо заключить, что $P_p = P_r$. Преобразовав уравнение (2.24), получим (2.26):

$$P_p = G_{гр}^A + \sigma_{сж} h l \mu. \quad (2.26)$$

Подставив выражение (2.26) в уравнение (2.22) получим (2.27):

$$F_q = \frac{(m_{гр} k_A g + \sigma_{сж} h l \mu) H}{h l}. \quad (2.27)$$

Построим график зависимости удельной силы сопротивления смыканию челюсти, от длины режущей кромки (рисунок 2.12).

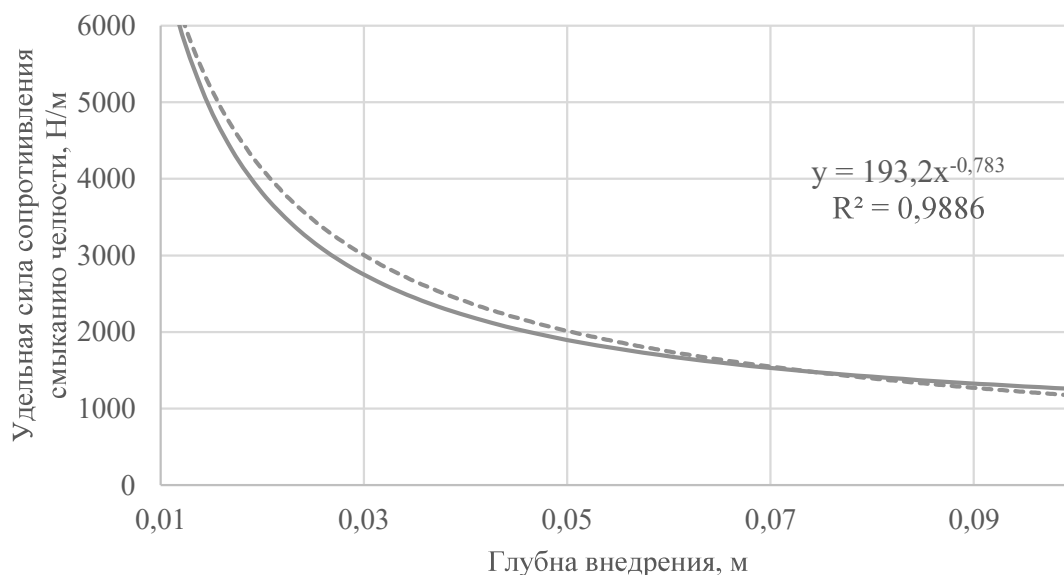


Рисунок 2.12 – График зависимости удельной силы сопротивления смыканию челюсти от глубины внедрения

Из графика видно, что с увеличением глубины внедрения, удельная сила сопротивления смыканию челюсти экспоненциально уменьшается, поэтому справедливо заключить, что максимальное усилие будет после первоначального внедрения в момент начала смыкания челюстей. Кроме того, при минимальных значениях глубины первоначального внедрения, сила сопротивления смыканию будет сильно выше, чем после внедрения на 5 мм и более. Поэтому при сборе КМК высокой крепости, когда веса и усилия подачи ковша будет недостаточно, следует рассматривать вариант наложения ударных импульсов на массив для обеспечения необходимого первоначального внедрения с последующим смыканием челюстей.

2.3.3 Нестандартные способы разрушения КМК резанием

Если рассматривать нестандартные способы сбора КМК грейферным ковшом, то стоит выделить два варианта.

1. Внедрение челюсти (челюстей) с последующим рыхлением перемещением ковша и зачерпывание разрыхленного массива (рисунок 2.13).

В данном случае грейферный ковш на манипуляторе представляет собой рыхлитель, который перемещаясь поступательно без подъема ковша производит рыхление определенного участка массива КМК. Для такой схемы важным параметром будет общее сопротивление движению W рукояти сборщика [17],

определяемое по выражению (2.28):

$$W = P_p + P_{пв} + P_{п} =$$

$$= 10Ch^{1,35}(1 + 0,5b) \left(1 - \frac{90^\circ - \delta}{180^\circ}\right) \beta_0 \mu_6 K_3 + gq_{пв} \rho t g \varphi_2 + gG_p f \quad (2.28)$$

где $P_{пв}$ – сопротивление перемещению призмы волочения, Н/м²;

$P_{п}$ – сопротивление перемещению рукояти, Н/м²; G_p – вес рукояти, кг·м/с²;

f – коэффициент сопротивления движению рукояти; b – ширина зуба ковша, м;

δ – угол резания, град;

β_0 – коэффициент влияния угла заострения зуба ковша;

μ_6 – коэффициент блокировки;

K_3 – коэффициент затупления режущей кромки.

2. Внедрение лопастей ударом (поочередно или одновременно) с последующим сколом и сбором отколотого ПИ (твердые пористые КМК).

Стоит отметить, что представленные схемы сбора будут являться скорее непредсказуемыми, так как в зависимости от неоднородности массива КМК по крепости и толщине слоя будут иметь место высокое разубоживание собранного материала, а также максимальный уровень вреда экосистемам дна.

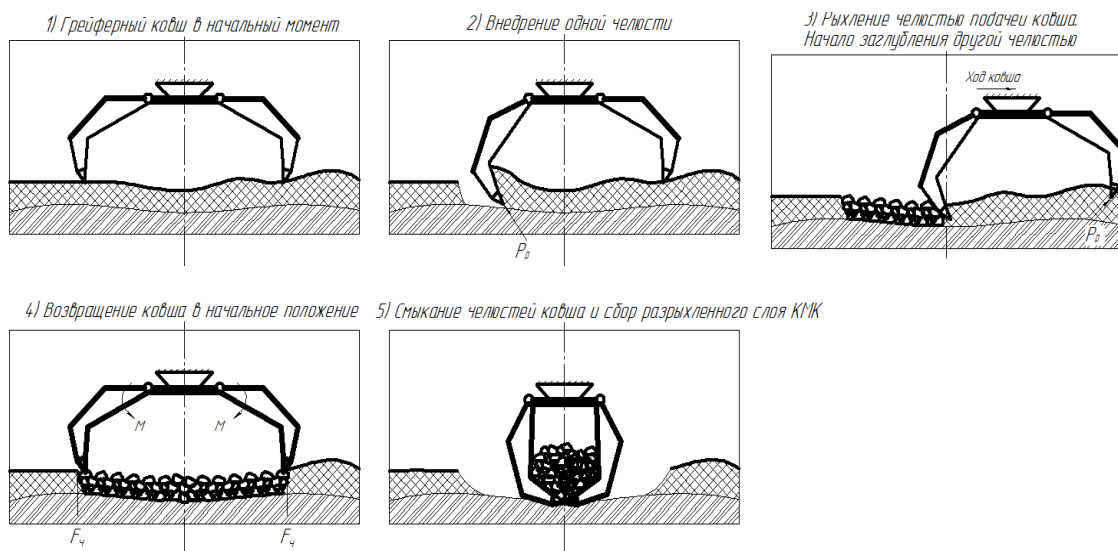


Рисунок 2.13 – Схема сбора КМК с предварительным рыхлением подачи ковша

Поэтому в случаях, когда КМК представляют собой сплошной ненарушенный массив с максимальным показателем сопротивления сжатию следует рассматривать комбинированные схемы, подразумевающие увеличение

интенсификации внедрения и отделения КМК от субстрата ударными импульсами.

2.4 Теоретическое исследование процесса разрешения КМК ударом

Как было сказано ранее, для увеличения интенсификации внедрения челюстей и снижения усилий на РЭ ковша при смыкании челюстей, предлагается оснастить его дополнительным скалывающим элементом – ударником.

Использование ударников, встроенных в исполнительный орган грейферного типа, является перспективным и энергоэффективным направлением и вероятнее всего может быть реализовано следующим способом.

Представленная на рисунке 2.14 схема сбора КМК грейферным исполнительным органом со встроенным ударником по оси ковша, подразумевает первоначальную отбойку (рыхление) массива КМК ударником, производство первоначального вруба с нарушением сплошности массива и последующее зачерпывание с разрыхлением. В данном случае на первый план выходит расчет процесса удара, обусловленного осевым усилием ковша.

В качестве ударников, по нашему мнению, могут эффективно использоваться разработанные конструкции гидроперфораторов [64, 65, 103, 106, 120, 135], при этом в основном функция вращения пики должна быть отключена с возможностью включения при заклинивании, что может происходить при разрушении образцов КМК весьма различных по составу.

Как следует из многочисленных результатов теоретических и экспериментальных исследований машин ударного действия и их рабочих инструментов, на примере работ пневматических и гидравлических ударников [2, 3, 32, 44, 88, 96, 98, 99, 103], оптимальными условиями должны быть случаи, когда машины наносят полноценный удар по разрушаемому материалу, а поршень-ударник производит полноценный удар по рабочему инструменту. В реальных условиях машины работают при режимах, весьма далеких от оптимальных, поэтому способы решения данной проблемы весьма актуальны и могут отличаться для условий глубоководной добычи.

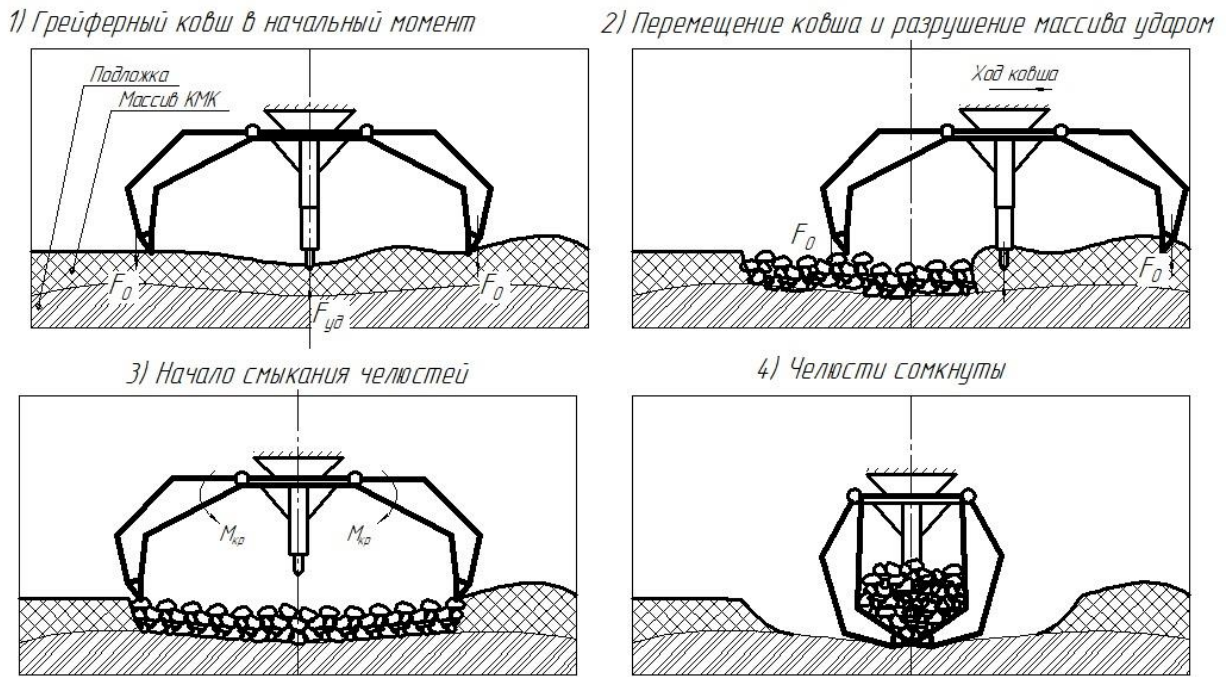


Рисунок 2.14 – Схема сбора КМК с предварительным рыхлением встроенным в ковш ударником

Характерным графиком, описывающим процесс внедрения ударника в разрушаемый материал, является зависимость изменения силы сопротивления породы от глубины внедрения инструмента.

Как видно из графика на рисунке 2.15 особенностью процесса внедрения инструмента в хрупкую породу является наличие скачков силы внедрения, которые возникают из-за хрупкого выкалывания частиц материала. Для них характерны практически линейный рост силы сопротивления материалов внедрению по мере углубления инструмента, сопровождающегося раздавливанием зерен породы и возникновение на определенной стадии хрупкого выкалывания материала и соответствующих ему скачкообразных изменений характеристики «давление-внедрение».

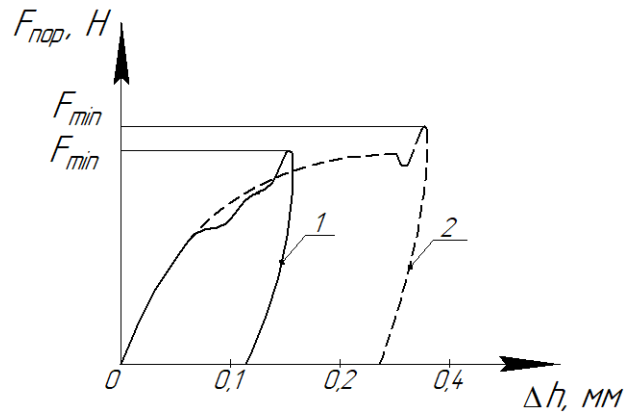


Рисунок 2.15 - Графики зависимости силы сопротивления породы от глубины внедрения породоразрушающего инструмента

При достижении наибольшего значения давления в контакте инструмента с материалом разрушение материала прекращается. После снятия нагрузки происходит частичное упругое восстановление породы. Вследствие этого остаточная глубина внедрения меньше максимально достигнутого внедрения на величину отпора инструмента материалом.

С учетом того, что на глубину внедрения инструмента в материал влияют такие параметры, как сила воздействия инструмента, коэффициент жесткости системы «инструмент-материал», длительность ударного импульса, коэффициент длительности импульса и площадь воздействия инструмента на материал, в реальных условиях величина внедрения инструмента в материал при единичном ударе может быть определена по известной формуле (2.29) [84]:

$$h_{0\text{уд}} = \sqrt{\frac{A_{\text{уд}}}{d\sigma_{\text{сж}}(\text{tg}(\alpha/2) + \mu)K_{\text{зат}}}}, \quad (2.29)$$

где $A_{\text{уд}}$ – энергия удара, Дж;

$\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности породы на сжатие, Н/м²;

d – диаметр инструмента, м;

α – угол заточки, град;

μ – коэффициент трения инструмента с породой;

$K_{\text{зат}}$ – коэффициент затупления инструмента.

Зависимость глубины внедрения пики единичного удара от различной энергии удара, при крепости породы $f=1$, при углах заточки лезвия $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$

представлена на рисунке 2.16.

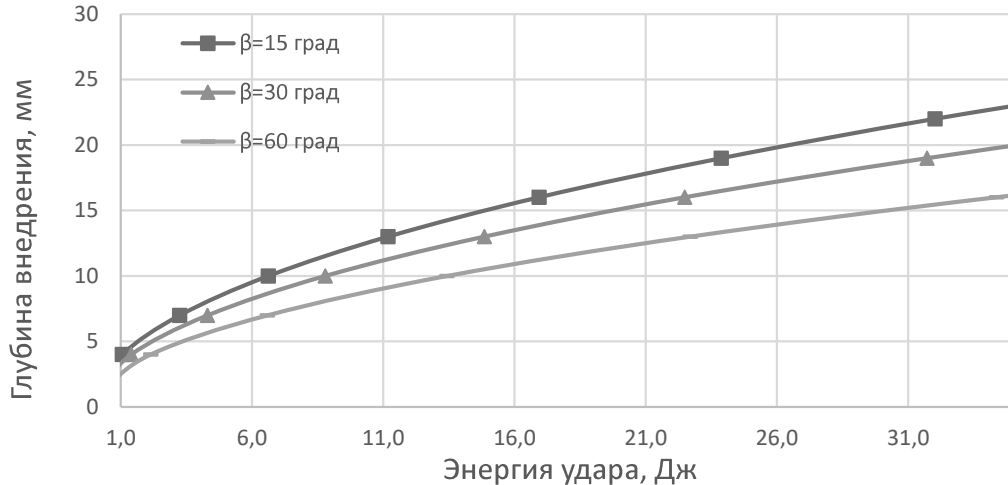


Рисунок 2.16 - Зависимости величины заглупления от энергии единичного удара

Однако, здесь необходимо отметить, что скорость разрушения материала определяется именно силой удара при определенной площади воздействия этой силы. При этом эффективность удара, создающего значительные контактные напряжения, разрушающие материал, целесообразно определять по величине деформированной массы [2, 9]. Эффективное разрушение материала в результате ударов по нему инструмента возможно лишь при их контакте непосредственно перед ударом, что приводит к возникновению больших контактных напряжений σ_k , определяемое выражением (2.30):

$$\sigma_k = \frac{F_{уд}}{S_{п}}, \quad (2.30)$$

где σ_k – контактное напряжение в стержне, МПа;

$S_{п}$ - площадь поперечного сечения инструмента или поршня-ударника, м²;

$F_{уд}$ – сила удара, Н.

Поэтому, для эффективного разрушения материала необходимо выполнение условия (2.31):

$$\sigma_k > (\sigma_k)_{min}. \quad (2.31)$$

Для описания процессов соударения твердых тел существует ряд теорий, основанных на тех или иных математических моделях продольного соударения тел: теория соударения абсолютно твердых тел, основанная на механике Ньютона; модель Герца, основанная на том, что основными деформациями являются

местные, а так же на том, что зависимость контактной силы от контактной деформации при ударе такая же, что при статическом сжатии тел; энергетическая модель удара, основанная на теореме об изменении кинетической энергии и предположениях о характере их деформации; дискретная модель удара, основанная на представлении о взаимодействии элементарных дискретных масс, связанных упругими элементами; волновая теория Сен–Венана [3], наиболее адекватно отражающая реальные динамические процессы в соударяемых телах и другие. Данные теории и модели являются основой для создания математического описания передачи деформации твердых тел в результате удара.

Использование энергии удара, как параметра машин ударного действия, связано с возможностями её измерения при условии использования известных параметров материалов и технологий изготовления как поршня-ударника, так и рабочих инструментов.

Процесс передачи ударных импульсов от поршня-ударника через инструмент к разрушаемому материалу происходит следующим образом: поршень-ударник приводится в действие гидроэнергией и наносит удары по торцу хвостовика инструмента, который передает ударный импульс разрушаемому материалу за определенное время соударения t , которое может быть определено выражением (2.32) [32]:

$$t = 2l_{\text{п}}/a, \quad (2.32)$$

где $l_{\text{п}}$ – длина поршня ударника;

a – скорость прохождения ударного импульса в инструменте ≈ 5300 м/с.

Сила $F_{\text{уд}}$, возникающая в инструменте при ударе определяется выражением (2.33) [30]:

$$F_{\text{уд}} = \frac{ES_{\text{п}}\vartheta_{\text{п}}}{2a}, \quad (2.33)$$

где $\vartheta_{\text{п}}$ – ударная скорость поршня 5-10 м/с;

E – модуль упругости материала стержней, $E = 21 \cdot 10^{10}$, Н/м².

В зависимости от контактного напряжения энергия импульса вычисляется по формуле (2.34):

$$A_{уд} = \frac{S_{п}a}{E} \sigma_{к}^2 t = \frac{S_{п}2l_{п}}{E} \sigma_{к}^2. \quad (2.34)$$

Выразим длину поршня из уравнения (2.34) и подставим уравнения (2.30) и (2.33). Тогда уравнение для определения длины поршня-ударника примет вид (2.35):

$$l_{п} = \frac{2a^2 A_{уд}}{E \vartheta_{п}^2 S_{п}}. \quad (2.35)$$

Из выражения (2.38) видно, что длина поршня ударника прямо пропорциональна энергии удара и обратно пропорциональна площади его сечения и квадрату ударной скорости. Для определения рациональных параметров поршня-ударника, построим графики зависимости скорости поршня от его длины при различной площади сечения (рисунок 2.17).

Отметим, что при увеличении скорости соударения можно достичь большего значения энергии импульса без изменения других параметров гидроударника. Ударную скорость поршня можно рассчитать исходя из параметров поршня и ударной системы по выражению (2.26) [12]:

$$\vartheta_{п} = 0,81 \sqrt{\frac{p_0 S_{г}}{q_{уд}}}, \quad (2.36)$$

где p_0 – рабочее давление в системе, кг/м²;

$S_{г}$ – габаритный ход поршня, м;

$q_{уд}$ – удельная масса поршня, кг · с³/м³.

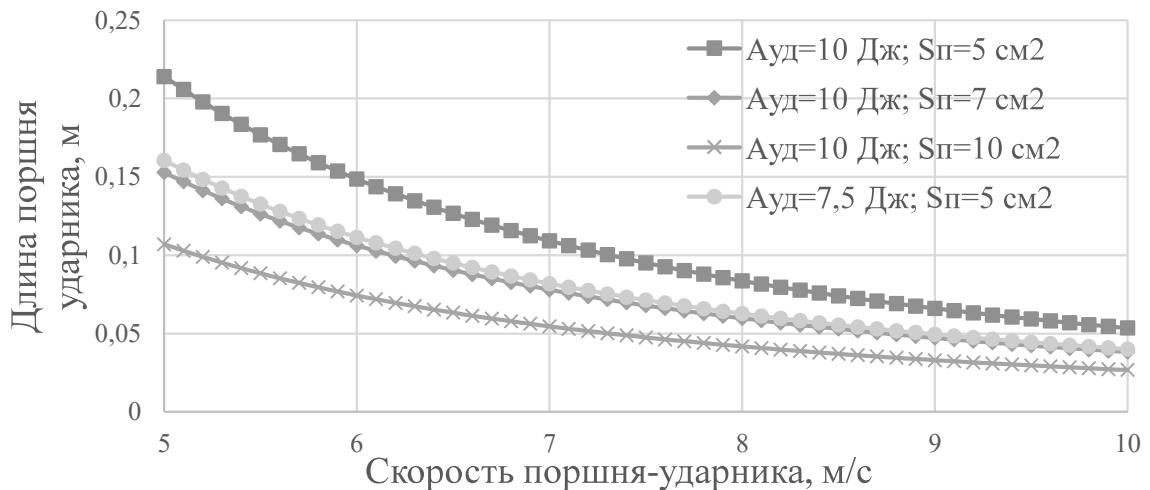


Рисунок 2.17 - График зависимости длины поршня-ударника от его скорости

Зная требуемую энергию удара, для разрушения КМК, которую следует получить экспериментально, можно найти рациональные параметры поршня-ударника: его длину, площадь сечения, массу и скорость соударения.

2.5 Теоретическое обоснование прироста эффективности сбора КМК используя комбинированную схему захвата

Известны достаточно эффективные способы разрушения массивов путем наложения ударных нагрузок на породоразрушающие инструменты горных машин [39, 43, 135].

Так как КМК могут находиться в состоянии, когда обычная схема захвата будет невозможна, а предварительное разрыхление челюстями или отдельным ударником будет увеличивать время цикла, следует рассмотреть комбинированную схему сбора, заключающуюся в наложении ударных нагрузок вместе с осевым усилием от внедряющейся челюсти и теоретически обосновать её эффективность.

Комбинированная схема подразумевает использование ударника внутри челюстей грейферного ковша, т.е. внедрение челюстями с использованием осевого усилия и ударного импульса ударника с последующим зачерпыванием путем откалывания образовавшихся кусков.

Комбинированная схема может сократить время цикла наполнения одного ковша за счет увеличения скорости внедрения и смыкания челюстей, а также обеспечить максимальное заполнение ковша полезным ископаемым с минимальным его разубоживанием, что также благоприятно скажется на окружающей среде, так как нижние слои (подложка) будут минимально подвержены воздействию исполнительного органа. Кроме того, при внедрении активной челюстью в массиве КМК будет формироваться зона предразрушения, ослабленная развитой системой трещин [2, 86, 88].

В ходе исследований было выдвинуто предположение о том, что для определения глубины первоначального внедрения активной челюсти в КМК при наложении ударной нагрузки возможно применение правила аддитивности, заключающегося в сложении значений глубины внедрения, полученных в

результате воздействия осевого усилия и ударной нагрузки.

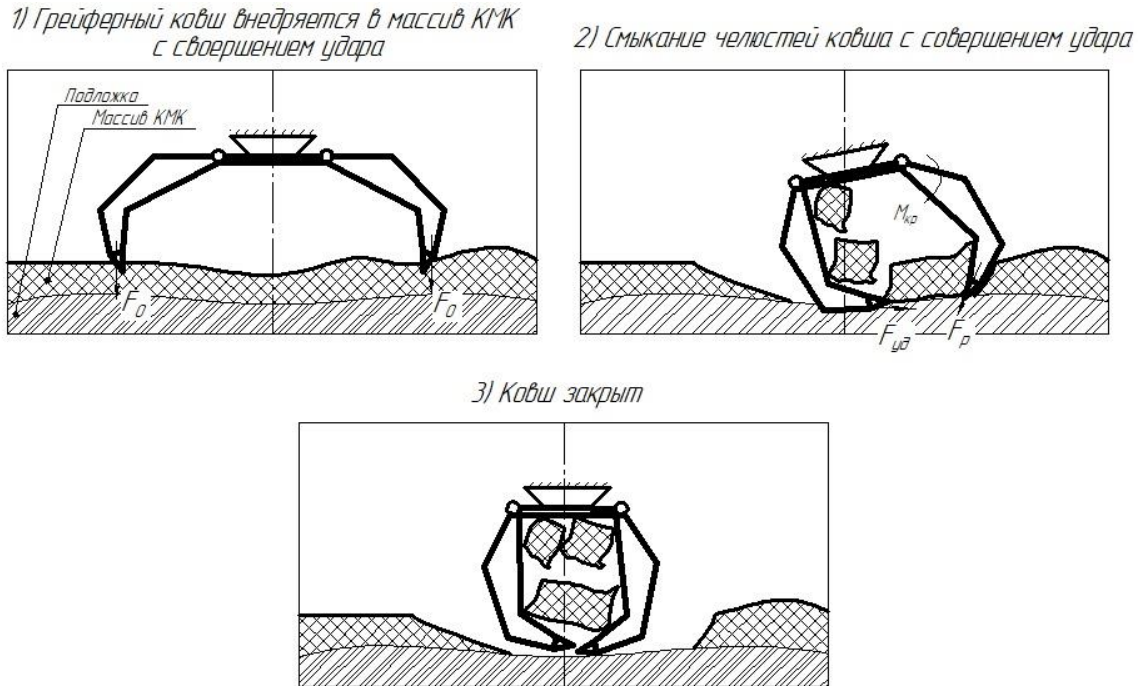


Рисунок 2.18 – Комбинированная схема сбора твердого массива КМК

Отсюда, выражение для нахождения глубины первоначального внедрения будет иметь вид (2.37):

$$h_0 = h_{0\text{вн}} + h_{0\text{уд}} = h_{0\text{вн}} + \sqrt{\frac{A_{\text{уд}}}{l\sigma_{\text{сж}}(\text{tg}(\beta/2) + \mu)K_{\text{зат}}}}. \quad (2.37)$$

где $h_{0\text{вн}}$ – глубина начального внедрения режущих элементов от усилия подачи грейфера, м;

$A_{\text{уд}}$ – энергия удара, Дж;

$\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности породы на сжатие, Н/м²;

l – длина режущей кромки инструмента, м;

β – угол заточки, град;

μ – коэффициент трения инструмента с породой;

$K_{\text{зат}}$ – коэффициент затупления инструмента, $K_{\text{зат}} = 0,85$.

После необходимого первоначального внедрения, челюсти грейферного ковша будут смыкаться, совершая удар активной челюстью, со скоростью отбойки (выражение (1.13)) и скоростью смыкания челюстей, обеспечивающей постоянное прижатие инструмента. Тогда скорость смыкания грейферного ковша

определяется по следующей формуле (2.38):

$$v_{\text{ч}} = v_{\text{см}} + \frac{A_{\text{уд}} n_{\text{уд}}}{hl\sigma_{\text{сж}}(\text{tg}(\beta/2) + \mu)K_{\text{зат}}}, \quad (2.38)$$

где $v_{\text{см}}$ – скорость смыкания челюстей грейфера, обусловленная выдвиганием штоков гидроцилиндров, м/с;

$n_{\text{уд}}$ – частота ударов, с⁻¹.

Окончательные значения величины первоначального заглубления и скорости смыкания челюстей возможно только после определения экспериментально значений удельного сопротивления внедрению и параметров РЭ грейферного ковша.

2.6 Определение параметров расчета производительности глубоководного комплекса

Основываясь на анализе ряда существующих комплексов, стоит отметить факторы, влияющие на производительность добычного агрегата (сборщика), представленные на рисунке 2.19, ключевыми из которых являются параметры и тип самого сборщика (центральная часть блок-схемы).

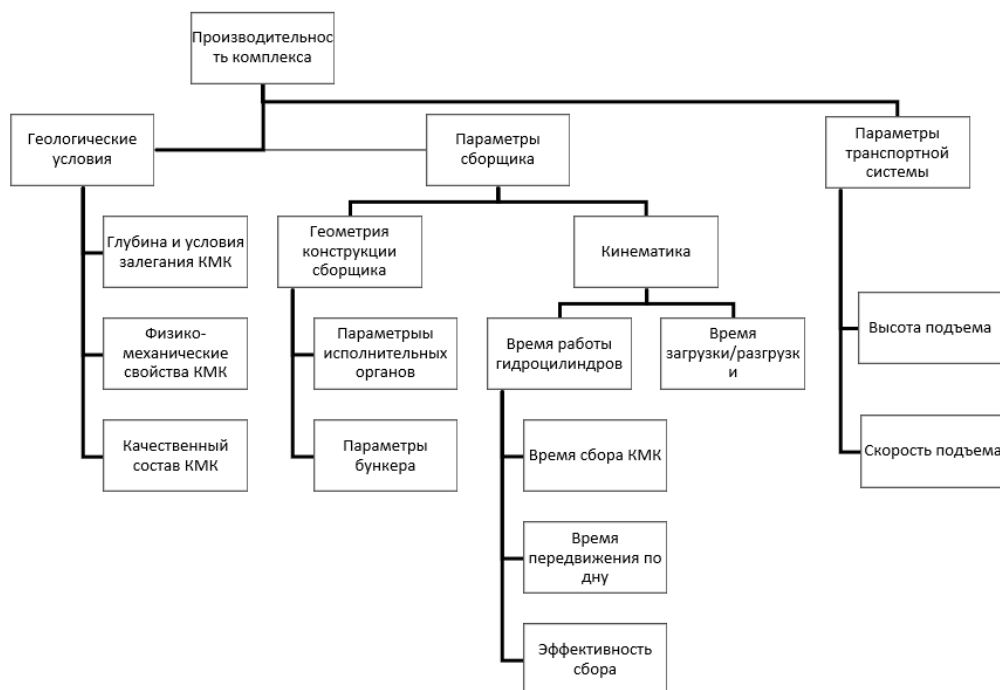


Рисунок 2.19 - Факторы, влияющие на производительность комплекса

Расчетную часовую производительность одного сборщика можно вычислить по формуле (2.39):

$$Q_{\text{расч}} = \frac{3600\rho_k V_6}{(T_{\text{уд}} + T_{\text{вн}} + T_{\text{загр}})n + T_{\text{дв}} + T_{\text{разгр}} + T_{\text{пер}}}, \text{ т/ч} \quad (2.39)$$

где ρ_k – плотность КМК, т/м³;

V_6 – объем промежуточного бункера, м³;

$T_{\text{уд}}$ – время предварительного разрушения КМК ударом, с;

$T_{\text{вн}}$ – время внедрения в КМК и сбора одного ковша, с;

$T_{\text{загр}}$ – время загрузки в бункер одного ковша, с;

n – количество загружаемых ковшей требуемое для наполнения бункера;

$T_{\text{дв}}$ – время передвижения к узлу перегрузки, с;

$T_{\text{разгр}}$ – время выгрузки бункера на перегружатель, с;

$T_{\text{пер}}$ – время передвижения прежнее или новое место сбора, с.

Задача расчета показателей $T_{\text{загр}}$, $T_{\text{дв}}$, $T_{\text{разгр}}$ и $T_{\text{пер}}$ заключается в расчете параметров, связанных с временем работы гидроцилиндров: передвижение лап и лопастей ковша. Каждая операция может быть рассчитана, как совокупность работающих одновременно или последовательно гидроцилиндров только после выбора необходимого типа гидроцилиндра для каждой операции.

Для значения временных показателей $T_{\text{уд}}$ и $T_{\text{вн}}$ требуется знать физикомеханические свойства КМК, усилия подачи исполнительного органа, время на разрушения КМК и их захвата. Данная задача решалась в ходе теоретического расчета (нахождение скорости внедрения и сбора КМК) и требует уточнения по результатам экспериментальных исследований. Также стоит отметить, что при реализации комбинированной схемы сбора, операция ударного разрушения будет отсутствовать, так как возможно зачерпывать КМК сразу после первоначального внедрения.

Выбор объема ковша будет также зависеть от свойств залегания месторождений КМК, в зависимости от их средней мощности (толщины слоя) подбирается такой ковш, заполняемость которого обеспечивается за одно черпание без высокого разубоживания.

Количество требуемых ковшей для заполнения бункера n зависят от объема

бункера и количества сборщиков. Данная задача в основном решается уже на этапе обоснования системы разработки месторождения, которая должна обеспечить максимальную непрерывность работы транспортной системы.

Основываясь на данных геологов, для обеспечения рентабельности требуется добыча 1 млн. т/год полезного ископаемого, что соответствует 110 - 125 т/час).

Для расчета объема скола и величины заглубления грейферного ковша следует использовать его геометрические параметры. Поэтому окончательный расчет производительности возможен после определения рациональных параметров ковша и гидроударника, а также варианта его использования, которые требуется определить в ходе экспериментальных исследований.

2.7 Выводы по главе 2

1. По обоснованной в первой главе наиболее предпочтительной конструкции подводного сборщика, определено его схемное решение в виде шагающего на манипуляторах агрегата с шарнирно закрепленным грейферным исполнительным органом и ударником для предварительного разрушения массива КМК.

2. Установлены фактические физико-механические свойства имеющихся образцов КМК, которые с увеличением влагонасыщения изменяются незначительно, что позволяет сделать вывод о возможности транспонирования полученных данные в ходе дальнейших теоретических и экспериментальных исследований на массив в реальных горно-геологических условиях.

3. Определен наиболее подходящий тип грейферного ковша – многочелюстной гидравлический с режущими элементами клиновидной формы, позволяющий осуществлять опирание на почву, закрепление на склонах гор, внедрение в массив КМК и отделение его рудной части от субстрата.

4. Определены возможные схемы сбора КМК грейферным исполнительным органом в зависимости от их прочности и условий залегания, а также теоретически исследованы возникающие на режущих элементах усилия при внедрении и дальнейшем смыкании челюстей.

5. Определена зависимость значения глубины внедрения, при которой

целесообразно использование клинового режущего элемента грейферного ковша с рациональными параметрами угла заострения клина β и длины режущей кромки l .

6. Определена экспоненциальная зависимость уменьшения удельной силы сопротивления смыканию челюсти с увеличением глубины внедрения, которая показала, что при увеличении начального внедрения в массив удельная сила сопротивления смыканию челюстей будет меньше в начальный момент смыкания.

7. С целью увеличения начального внедрения в массив КМК определены возможные схемные решения грейферного ковша со встроенным ударником по оси ковша и/или в его челюстях, а также последовательность процесса сбора КМК при использовании данных решений.

8. С целью расчета оптимальных габаритов и параметров ударной системы встроенного ударника по известным выражениям Иванова К. И. определена зависимость длины поршня-ударника от его ударной скорости при различной энергии удара и площади сечения поршня, которая с увеличением ударной скорости экспоненциально убывает.

9. Определены выражения для расчета величины первоначального заглубления и скорости смыкания челюстей грейферного ковша при реализации комбинированной схемы сбора со встроенным в челюсти ударниками.

10. Определены параметры расчета теоретической производительности подводного сборщика с грейферным исполнительным органом и встроенным ударником показывающие какие данные необходимо получить в ходе экспериментальных исследований.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КМК ГРЕЙФЕРНЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ОРГАНОМ СО СКАЛЫВАЮЩИМ УЗЛОМ

3.1 Постановка цели и задач экспериментальных исследований

В данной главе приводятся результаты экспериментальных исследований, целью которых является определение основных закономерностей процесса разрушения КМК резанием (внедрение грейферного ковша) и ударными импульсами (внедрение в массив и отделение КМК от подложки), а также проверка теоретических исследований эффективности комбинированной схемы сбора КМК грейферным исполнительным органом скалывающим узлом.

Эффективность исполнительного органа достигается контролируемым заглублением в слой КМК с последующим увеличением интенсификации процесса отделения слоя КМК ударом без повреждения подложки для повышения качества и производительности сбора КМК.

В соответствии с данной целью сформулированы основные задачи экспериментальных исследований:

- 1) разработка и изготовление экспериментального стенда для изучения разрушения КМК ударом и резанием;
- 2) разработка методики проведения экспериментальных исследований;
- 3) определение глубины внедрения инструмента, а также процесса отделения КМК от подложки при наложении ударных нагрузок с установлением зависимости величины внедрения пики в образцы КМК от величины энергии удара;
- 4) исследование процесса разрушения КМК резанием одиночным резцом с определением силовых и энергетических показателей процесса резания;
- 5) исследование сопротивления внедрению режущего элемента клиновидной формы с установлением зависимости величины внедрения резца в образцы КМК от величины осевой нагрузки;
- 6) анализ полученных в результате проведения экспериментальных исследований данных и сравнение их с результатами теоретических исследований.

Исследования проводились на образцах КМК с субстратом из брекчии и известняке (рисунок 3.1), отобранных экспедицией АО «Южморгеология» в разведочном участке зоны Кларион-Клиппертон Тихого океана.



Рисунок 3.1 - Образцы КМК используемые в экспериментальных исследованиях

Исследования образцов на определение физико-механических свойств, проводились в ходе теоретических исследований и представлены в таблице 2.1 главы 2.

3.2 Стенды для исследований процесса разрушения КМК породоразрушающим инструментом

В соответствии с сформулированными задачами исследования и требованиям к установкам для испытаний, был спроектирован и изготовлен стенд для исследований разрушения КМК ударом (рисунок 3.2, а) и подготовлена многофункциональная испытательная машина Zwick/Roell Z100 для исследований разрушения КМК резанием (рисунок 3.2, б).

Экспериментальный стенд (рисунок 3.2, а) для исследования разрушения КМК ударом представляет собой маятниковый копер, состоящий из станины 1, на которой установлена мачта 2 с вращающимся на ней маятнике 3 и породоразрушающим инструментом 4. Для закрепления образца 5 на станине 1, изготовлена специальная оснастка 6. Регулировка положения образца КМК и его фиксация внутри оснастки производится деревянными прокладками различной

толщины (от 3 до 8 мм) и размером 50x50 мм. Вращение маятника происходит по окружности с радиусом, равным его длине 470 мм, передавая при этом импульс с различной энергией удара в точке перехода кинетической энергии в потенциальную. Создание импульса с различной энергией удара $A_{уд}$, осуществляется отводом маятника на различные углы 35, 55 и 90 градусов.

Контролируемые параметры: глубина внедрения пики в зависимости от места удара и параметров инструмента, энергия одиночного удара.

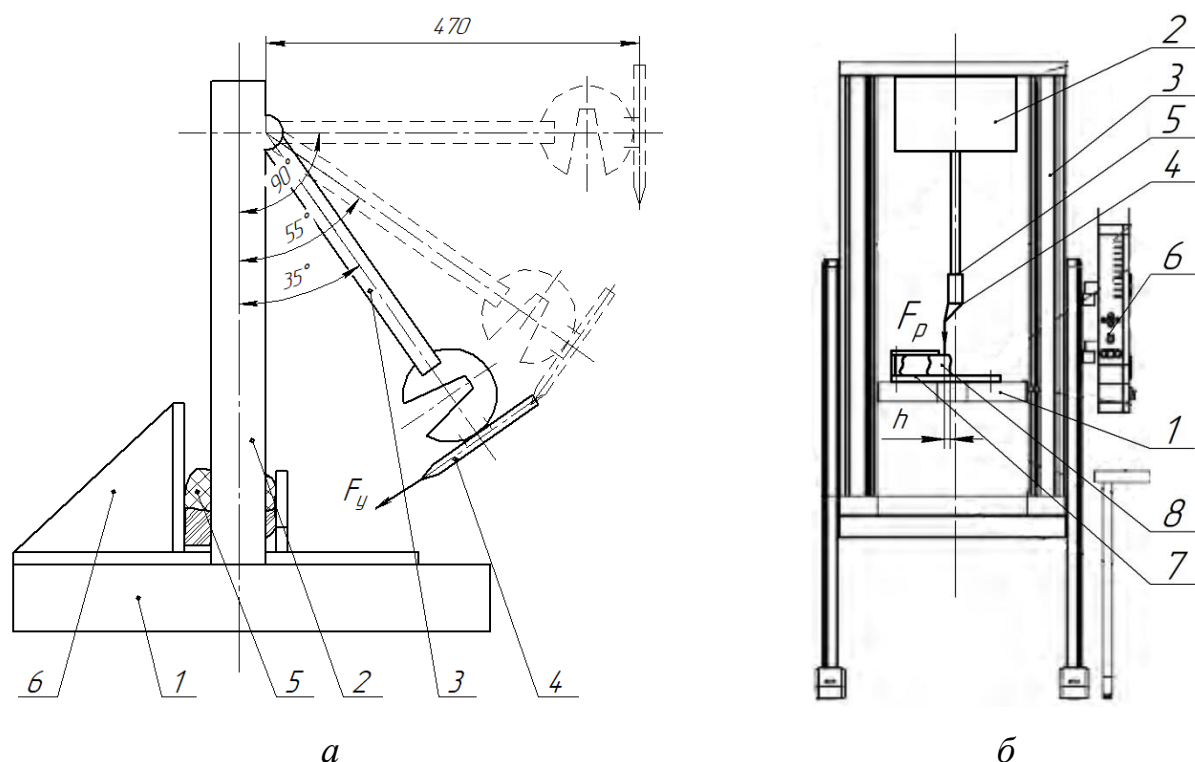


Рисунок 3.2 - Экспериментальные стенды: *а* - для исследования разрушения КМК ударом; *б* - для исследования разрушения КМК резанием

Испытательный стенд Zwick/Roell Z100 (рисунок 3.2, *б*) представляет собой конструкцию, с неподвижной цокольной траверсой 1, в которой установлен высокоточный датчик силы, и подвижной траверсой 2, передвигающейся через винтовую передачу 3, с закрепленным резцом 4 на штанге 5. Все управление происходит через пульт управления 6 на стенде и выводится на компьютер с помощью специального программного обеспечения. Для исследований образцов КМК, которые имеют нестандартную форму, использовалась специальная оснастка 7, для закрепления образцов КМК 8. Используемый стенд позволяет измерять силовые и энергетические показатели процесса резания, а также усилие

подачи закрепленного на подвижной траверсе инструмента.

Все измерительные системы станда были поверены и удовлетворяют техническим характеристикам, указанным в паспорте и документации на испытательный стенд [53].

Породоразрушающий инструмент экспериментальных стандов:

- при исследовании ударных воздействий на маятниковом копре, использовалась пика с параметрами: угол заострения $\beta = 25^\circ$; диаметр пики $d = 18$ мм;

- при исследовании процесса резания КМК использовался резец клиновидной формы с параметрами: длина режущей кромки $l=0,01$ м; угол заострения $\beta = 60^\circ$, скорость движения инструмента $V_p=0,0125$ м/с (исходя из возможностей испытательной машины [53]).

- при исследовании процесса внедрения инструмента в образцы КМК использовались пики-лопатки клиновидной формы согласно параметрам таблицы 3.1.

Таблица 3.1 - Параметры экспериментальных режущих элементов

Номер режущего элемента	l , м	β , град
1	0,04	30
2	0,04	80
3	0,02	30
4	0,01	30

Параметры режущих элементов выбраны, опираясь на теоретические исследования (рисунок 2.8), которые показали необходимость исследования режущих элементов со значениями углов от 20 до 80 градусов и длиной режущей кромки от 10 до 30 мм.

Контролируемые, в ходе экспериментов параметры: глубина внедрения пики; усилие резания одиночного резца в зависимости от толщины стружки; усилие подачи инструмента в зависимости от глубины внедрения.

3.3 Разработка методики и последовательности проведения экспериментальных исследований

Установление зависимостей внедрения инструмента в образцы КМК в

зависимости от различных факторов следует осуществлять в соответствии с методикой рационального планирования эксперимента [28, 29, 56, 87].

Проведение экспериментальных исследований начинается с подготовки образцов КМК для заданных экспериментальных стендов, т. е. обрезка, шлифование поверхностей, к которым прикладываются зажимы оснастки для четкой фиксации образца. Подгонка породоразрушающего инструмента производится в ручном режиме с использованием штангенциркуля.

1. В части эксперимента с использованием копра производилась следующая последовательность:

- установка оснастки для закрепления образца на основание копра (рисунок 3.3, *а*);
- фиксация пики на маятнике и центрирование образца таким образом, чтобы, пика совершала удар по вертикальной оси образца;
- отвод и фиксация маятника в первом положении с помощью предохранителя (рисунок 3.3, *б*);



а



б

Рисунок 3.3 – Проведение эксперимента по разрешению КМК ударом:

а - фотография маятникового копра перед ударом; *б* - фотография закрепленного в оснастке образца КМК

- снятия предохранителя для инициации движения маятника и осуществления удара по образцу;
- замер величины заглубления инструмента и наличие трещин разрушения;

- перестановка образца и закрепление маятника в следующем положении для увеличения энергии удара;

- повторение последовательности для проведения серий ударов по другим осям образцов КМК: по горизонтальной оси в слой рудной части; по горизонтальной оси в место соединения рудной части с субстратом; по горизонтальной оси в субстрат;

- сведение всех результатов в журнал проведения эксперимента с расчетом энергии удара в зависимости от скорости движения маятника по выражению (1.10).

2. В части эксперимента с использованием испытательной машины Zwick/Roell Z100, производилась следующая последовательность:

- на неподвижную (цокольную) траверсу устанавливается оснастка для крепления образца КМК, образец фиксируется в оснастке таким образом, чтобы обеспечить требуемую толщину стружки при прохождении резца (рисунок 3.4);

- на подвижную траверсу устанавливается штанга с одиночным резцом, параметры, которого удовлетворяют требованиям испытаний и отводится на первоначальное положение (рисунок 3.4);

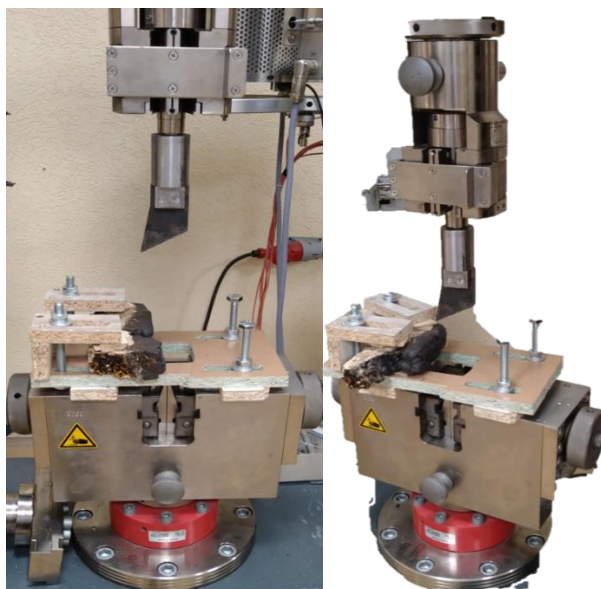


Рисунок 3.4 - Фотографии машины Zwick/Roell Z100, подготовленной к испытанию образца КМК на срез

- производятся настройки программы испытаний, где устанавливаются параметры системы и запускается программа испытаний с помощью

программного обеспечения;

- производится ряд испытаний на значении толщины стружки 10, 20 и 30 мм;
- произведение измерения образца: формы реза, параметров скола, поверхность образца;
- сохраняется график с записью данных процесса резания образца для дальнейшего анализа.

3. Проведение серии экспериментов по внедрению инструмента в образцы КМК проводилось по следующей последовательности:

- на неподвижную (цокольную) траверсу устанавливается оснастка для крепления образца КМК, образец фиксируется в оснастке таким образом, чтобы обеспечить внедрения инструмента в массив по вертикальной оси;
- на подвижную траверсу устанавливается штанга с режущим элементом, параметры, которого удовлетворяют требованиям испытаний и отводится на первоначальное положение;
- производятся настройки программы испытаний, где устанавливаются параметры системы и запускается программа испытаний с помощью программного обеспечения;
- производится ряд испытаний с инструментами различных параметров (таблица 3.1) и фиксируется сила внедрения при достижения определенной глубины;
- для каждого инструмента производится по три испытания внедрения инструмента на определенную глубину и фиксация нагрузки в момент остановки;
- расчет эмпирических зависимостей удельного сопротивления внедрению производился по выражению (2.2) с использованием коэффициентов формы клиновых РЭ [93].

3.4 Результаты экспериментальных исследований разрушения КМК ударом

На рисунке 3.5 представлены фотографии проведения эксперимента с маятниковым копром. Анализ глубины внедрения пики в образцы КМК по различным осям показал, что субстрат имеет значительно большую крепость

(рисунок 3.5, *а*) в отличие от рудной части корки (рисунок 3.5, *б*). Также замечалась тенденция к отколу больших кусков полезного ископаемого от субстрата при ударе в место соединения. Данная закономерность позволяет говорить о правомерности суждения, что при комбинированной схеме сбора, важным фактором, повышающим эффективность, будет осуществления удара в место соединения, при смыкании челюстей грейфера.

*а**б**в*

Рисунок 3.5 – Результаты серии ударов пикой:

а – в известняковую подложку КМК; *б* – в тело КМК; *в* – отделение КМК от подложки после удара в место соединения с измерением величины заглубления.

По результатам, полученным в ходе экспериментальных исследований разрушения КМК ударом, были построены графики зависимости глубины внедрения пики в образцы КМК по различным осям от энергии удара (рисунок 3.6).

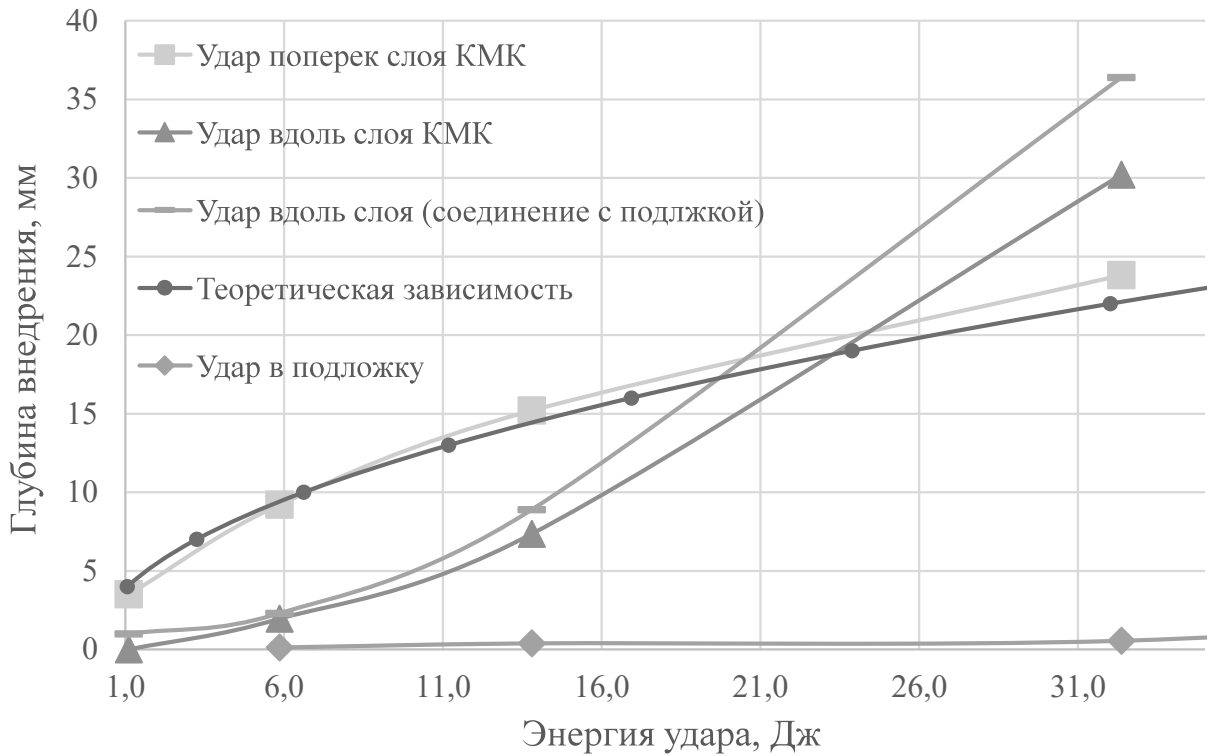


Рисунок 3.6 – График экспериментально полученных зависимостей глубины внедрения инструмента в образцы КМК по различным осям

Анализ зависимостей (рисунок 3.6) наглядно показывает, что при совершении ударов поперек рудного слоя КМК (сверху), увеличение глубины внедрения с увеличением энергии удара происходит по зависимости, близкой к теоретической (2.33), что говорит о высокой сходимости экспериментальных данных. При совершении ударов вдоль слоев напластования образцов, особенно в место соединения КМК с подложкой заглабление происходило совместно с откалыванием кусков, что подтверждает предположение о повышении интенсификации отделения рудной части при использовании встроенного ударника

Рассчитаем погрешность значений глубины внедрения пики ударника в КМК между теоретическими и экспериментальными исследованиями по выражению (3.1):

$$\left(1 - \frac{h_{0э}}{h_{0р}}\right) 100 \% = 5 \%, \quad (3.1)$$

где $h_{0э}$ – среднее значение глубины внедрения пики в КМК, полученное в ходе экспериментальных исследований, м;

$h_{ор}$ – среднее расчетное значение глубины внедрения пики в КМК, полученное в ходе теоретических исследований, м.

Таким образом можно сделать вывод, что теоретическая зависимость глубины внедрения от энергии удара, представленная выражением (2.29) хорошо описывает изучаемый процесс.

3.5 Результаты экспериментальных исследований разрушения КМК резанием

По результатам экспериментов разрушения КМК резанием на испытательной машине Zwick/Roell Z100 с помощью программного обеспечения были сняты зависимости усилия подачи от деформации сжатия КМК при различной толщине стружки, представленные на рисунке 3.7.

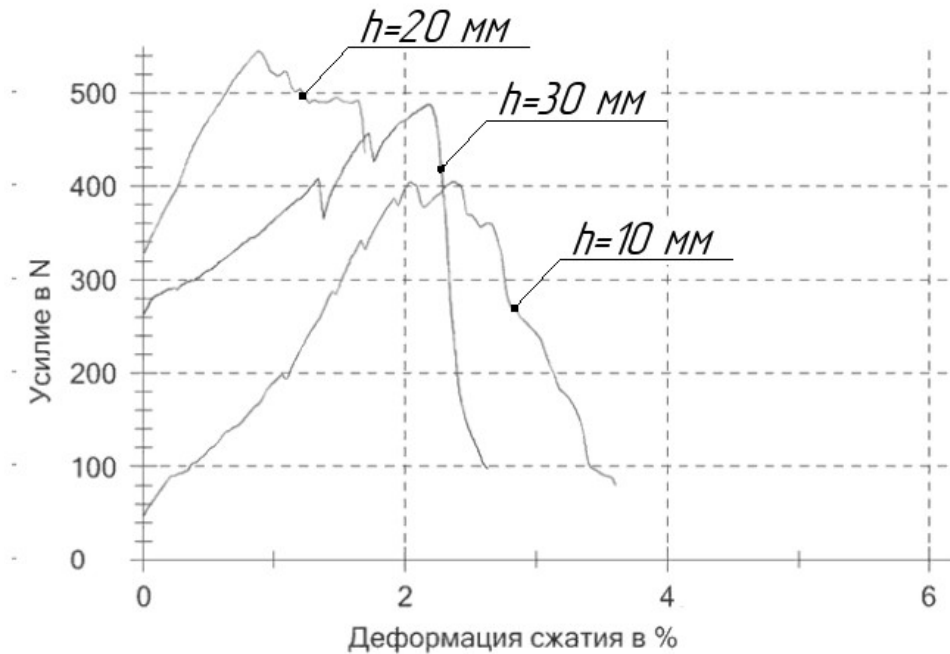


Рисунок 3.7 – Графики зависимостей усилия подачи от деформации сжатия КМК при различной толщине стружки

Анализ зависимостей на рисунке 3.7, показал, что полноценного резания КМК проходом резца с постоянной стружкой резания достигнуть не всегда получалось из-за высокой хрупкости материала, что говорит о трудности предсказания основного параметра процесса резания КМК, и большом разбросе величин средних толщин стружек.

Дальнейшая часть экспериментов заключалась в серии опытов по

определению удельного сопротивления внедрению режущих элементов с различными параметрами в массив КМК, позволяющего использовать зависимость (2.2), силы сопротивления внедрению от параметров РЭ грейферного ИО.

Инструмент, с параметрами, указанными в таблице 3.1, поочередно внедрялся до глубины от 5 до 20 мм. В процессе внедрения, в режиме реального времени, фиксировались показатели усилия, отображаемые на мониторе установки. Данные значения записывались, как усилие сопротивления внедрению. Графики зависимостей усилия сопротивления внедрению от глубины внедрения инструментов № 1-4 представлены на рисунке 3.8.

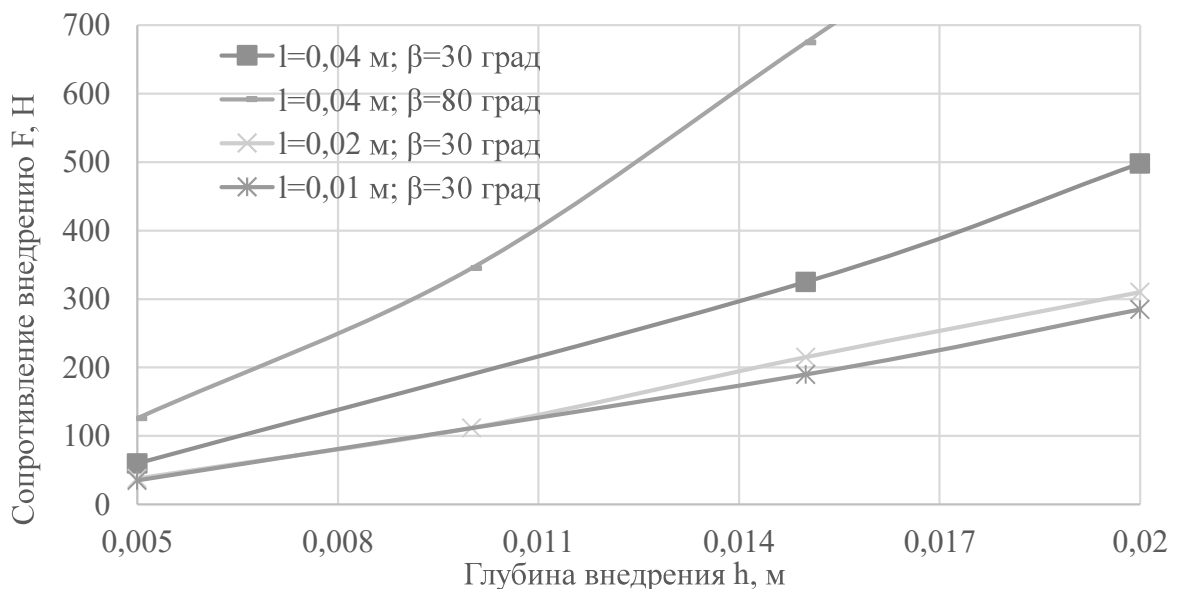


Рисунок 3.8 - График зависимостей усилия сопротивления внедрению от глубины внедрения инструментов

Анализ зависимостей (рисунок 3.8) показал, что инструмент со значением угла заострения 80 градусов, при внедрении в КМК испытывал наибольшее значение усилия внедрения, что подтверждает результаты теоретических исследований и не удовлетворяет требованиям к грейферному ИО.

3.6 Обработка результатов эксперимента

Проверка воспроизводимости результатов измерения глубины внедрения пики в образцы КМК при различной энергии удара производилась путем сравнения расчетного G и табличного $G_{\text{табл}}$ значения критерия однородности

дисперсии Кохрена [87]. При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и количестве экспериментов $n=4$, $G_{\text{табл}}=0,681$. Если выполняется условие $G < G_{\text{табл}}$, то ряд дисперсии однороден и соответственно результаты экспериментов воспроизводимы.

Расчетное значение критерия Кохрена определялось по выражению (3.2):

$$G = \frac{\sigma_{vmax}^2}{\sum_{v=1}^N \sigma_v^2}, \quad (3.2)$$

где σ_{vmax}^2 – максимальное среднеквадратичное отклонение.

Среднеквадратичное отклонение рассчитывается по выражению (3.3):

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})}{n - 1}, \quad (3.3)$$

где h_i – значение величины заглабления, м;

\bar{h} – среднее значение величины заглабления, м;

n – число замеров в выборке.

Доверительный интервал для значения величины внедрения пики в образцы КМК h определялось из соотношения (3.4):

$$J_z = \frac{2\varepsilon}{\bar{h}} \leq 3 \div 5 \%, \quad (3.4)$$

где ε – точность величины математического ожидания, $\varepsilon = t_\gamma \sigma / \sqrt{n}$;

t_γ – квантиль распределения Стьюдента для заданной доверительной вероятности γ [87].

Также проверяется относительное значение дисперсии по соотношению (3.5):

$$J_\sigma = \frac{\sigma \sqrt{n-1} (\sqrt{1/\chi_1^2} + \sqrt{1/\chi_2^2})}{\bar{h}} \leq 3 \div 5 \%, \quad (3.5)$$

где χ_1 и χ_2 – значения критерия Пирсона [87].

Рассчитанные параметры для определения сходимости экспериментальных исследований приведены в таблице 3.2.

Для оценки степени влияния параметров режущих инструментов, при исследовании внедрения их в КМК, использовался метод регрессивного анализа с применением математического планирования эксперимента [87, 89]. Факторами,

воздействующие на параметр сопротивление внедрению ($F_{вн}$, м), приняты: длина режущей кромки (l , м), угол заострения (β , град) и глубина внедрения (h_0 , мм) (таблица 3.3), на основании чего составлена матрица планирования трехфакторного эксперимента, представленная в таблице 3.4.

Таблица 3.2 – Расчетные параметры для определения сходимости результатов эксперимента на маятниковом копре

$A_{уд}$, Дж	\bar{h}	σ	J_z , %	J_σ , %	G
1,1	1,66	0,162	4,05	2,95	0,358
5,85	4,48	0,196	3,65	2,57	
13,8	10,48	0,158	4,15	3,45	
32,4	30,13	0,185	2,98	3,12	

Таблица 3.3 – Границы изменения факторов

Натуральные значения факторов (кодировка)	Нижний уровень	Верхний уровень	Центр планирования	Интервал варьирования
l , м (x_1)	0,01	0,04	0,025	0,015
β , град (x_2)	30	80	60	20
h_0 , мм (x_3)	5	20	12,5	7,5

Количество опытов определено следующим соотношением (3.6):

$$N = p^k = 2^3 = 8, \quad (3.6)$$

где p – число уровней (для ПФЭ $p=2$);

k – количество факторов, $k=3$.

Таблица 3.4 - Матрица планирования трехфакторного эксперимента

План								Результаты
x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	\bar{y}_p
+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	35.0
+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	59.9
+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	499.7
+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	126.6
+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	285.4
+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	498.8
+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	2800.3
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1005.1

Расчет коэффициента регрессии, например, для фактора x_1 , производился по следующему выражению (3.7):

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_1 \bar{y}_{pi})}{N}, \quad (3.7)$$

где \bar{y}_p – среднее значение полученных экспериментально значений $F_{\text{вн}}$.

Аналогично рассчитав коэффициенты регрессии для остальных факторов, определено уравнение регрессии (3.8) в общем виде:

$$y = 663,86 - 241,3x_1 + 444,07x_2 + 483,54x_3 - 300,8x_1x_2 - \\ - 154,2x_1x_3 + 311,23x_2x_3 - 201,3x_1x_2x_3. \quad (3.8)$$

Коэффициенты регрессии проверены на значимость по критерию Стьюдента по следующему выражению (3.9):

$$\Delta b_i = \pm t_\gamma S(b_i), \quad (3.9)$$

где $S(b_i)$ – ошибка коэффициента регрессии;

t_γ – коэффициент Стьюдента, при количестве степени свободы $f = N(n - 1) = 16$; и доверительной вероятности $\gamma = 95$, $t_\gamma = 2,119$;

n – число параллельных опытов, $n = 3$.

Ошибка коэффициентов регрессии рассчитывалась по выражению (3.10):

$$S(b_i) = \sqrt{S^2(b_i)}, \quad (3.10)$$

где $S^2(b_i)$ – дисперсия коэффициентов регрессии.

Дисперсия коэффициентов регрессии определяется выражением (3.11):

$$S^2(b_i) = \frac{S^2(y)}{Nn}, \quad (3.11)$$

где $S^2(y)$ – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсия воспроизводимости рассчитывается по формуле (3.12):

$$S^2(y) = \frac{\sum S_i^2}{N}, \quad (3.12)$$

где S_i^2 – построчная дисперсия параллельных опытов.

Построчная дисперсия параллельных опытов определяется из выражения (3.13):

$$S_i^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y}_p)^2}{n - 1}. \quad (3.13)$$

Расчет доверительного интервала коэффициентов регрессии представлен в

таблице 3.5.

Так как все полученные коэффициенты регрессии больше полученного доверительного интервала $\Delta b_i = \pm 0,672$, следовательно, они статистически значимы [89].

Таблица 3.5 – Расчет доверительного интервала коэффициентов регрессии

\bar{y}_p	S_i^2	$S^2(y)$	$S^2(b_i)$	$S(b_i)$	Δb_i
35,0	0,503	2,411	0,100	0,317	0,672
59,9	1,213				
499,7	4,333				
126,6	3,103				
285,4	2,643				
498,8	2,143				
2800,3	4,333				
1005,1	1,013				

Перевод уравнения регрессии в натуральную форму производился, используя следующие выражения (3.14) – (3.16) для определения факторов:

$$x_1 = \frac{l - 0,025}{0,015} = 66,66l - 1,78; \quad (3.14)$$

$$x_2 = \frac{\beta - 60}{20} = 0,05\beta - 3; \quad (3.15)$$

$$x_3 = \frac{h_0 - 12,5}{7,5} = 0,13h_0 - 1,66; \quad (3.16)$$

Переведя уравнение регрессии (3.6) в натуральную форму, получим выражение (3.17) для определения силы сопротивления внедрению:

$$F_{\text{вн}} = 332,5 - 5692,29l - 7,05\beta - 161,96h_0 - 109,51l\beta + \\ + 3896,41lh_0 + 4,23\beta h_0 - 86,56l\beta h_0 \quad (3.17)$$

Проверка полученного уравнения, подставив значения факторов на верхнем уровне показала адекватность полученного уравнения (3.17).

Анализ полученных уравнений регрессии (3.8) и (3.17) позволяет сказать о том, что наибольшее влияние на сопротивление внедрению оказывает глубина внедрения РЭ в поверхность КМК и длина режущей кромки. Поэтому, для повышения эффективности внедрения грейфера в КМК выбор указанных параметров будет оказывать существенное влияние.

В результате проведенных исследований построен график зависимости изменения удельного сопротивления внедрению РЭ в КМК от длины режущей кромки и установлен порог влияния данной длины РЭ на удельное сопротивление внедрению (рисунок 3.9).

Анализ зависимости (рисунок 3.9) показывает, что удельное сопротивление внедрению в КМК убывает по закону, близкому к экспоненциальному, при увеличении длины режущей кромки с пределом влияния около 0,04 м.

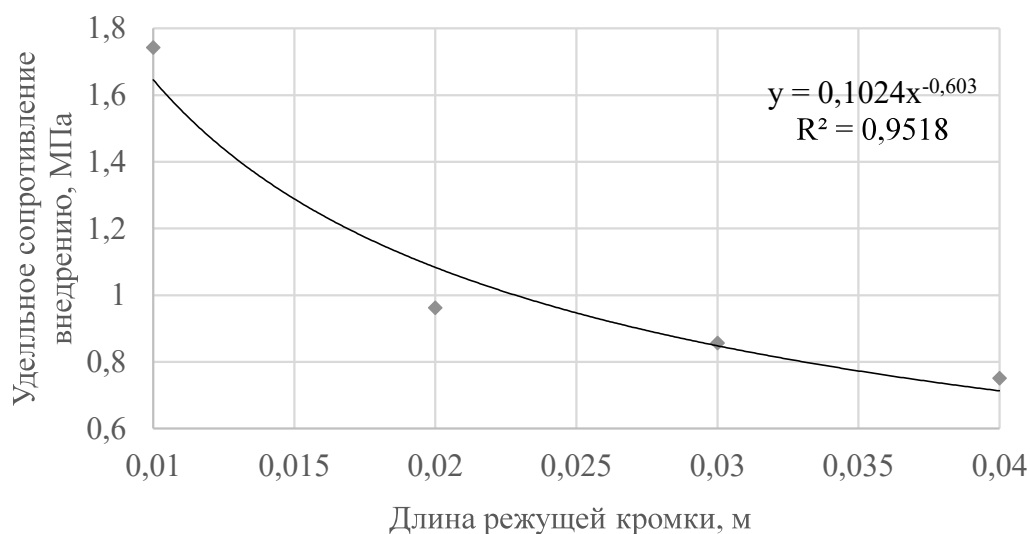


Рисунок 3.9 - Зависимость удельного сопротивления внедрению ($\sigma_{вн}$) КМК от длины режущей кромки клинового РЭ

Определив удельное сопротивление внедрению по графику на рисунке 3.9 для различных значений длины режущей кромки и глубины внедрения, определено влияние угла заострения на величину силы сопротивления внедрению (рисунок 3.10).

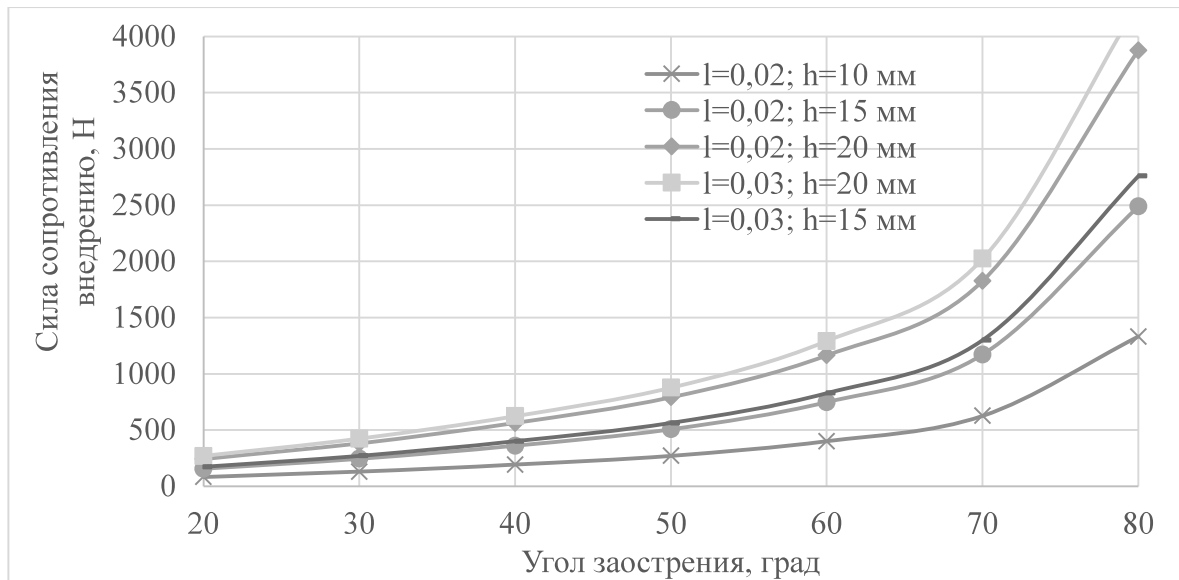


Рисунок 3.10 – График зависимости силы сопротивления внедрению от угла заострения РЭ клиновидной формы с различными параметрами длины режущей кромки при изменяемой глубине внедрения

Анализ графиков на рисунке 3.10 показывает, что оптимальными с точки зрения энергоёмкости являются значения длины режущей кромки 20...30 мм, а угла заострения 30...50 градусов, что позволяет достигать глубину внедрения в КМК 10...20 мм при силе сопротивления внедрению на РЭ до 1000 Н.

3.7 Выводы по главе 3

1. Экспериментально установлена квадратичная зависимость величины фактического внедрения пики поперек рудного слоя образцов КМК от энергии удара, которая не выходит за пределы погрешности 5 % от теоретической.
2. Экспериментально установлены зависимости величины фактического внедрения пики вдоль рудного слоя образцов КМК от энергии удара, экспоненциальный рост которых обусловлен хрупкостью материала рудной части КМК и тенденцией к откалыванию кусков, подтверждающий эффективность использования комбинированной схемы сбора КМК, при которой удар совершается при смыкании челюстей с встроенными в них ударниками.
3. Экспериментально установлена зависимость усилия подачи от деформации сжатия КМК при различной толщине стружки с выводом того, что из-за высокой хрупкости и пористости КМК, сложно добиться срезания единой стружки.

4. Экспериментально установлены экспоненциальные зависимости силы сопротивления внедрению образцов КМК от глубины внедрения при различных параметрах инструмента и определено значение удельного сопротивления внедрению для различных параметров режущих элементов.

5. Экспериментально установлена зависимость удельного сопротивления внедрению в КМК от длины режущей кромки РЭ и определены возможные оптимальные значения параметров угла заострения и длины режущей кромки РЭ с целью снижения энергоемкости процесса внедрения челюстей грейфера в КМК.

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

Условия залегания глубоководных КМК и их неоднородность по мощности и твердости даже в пределах одного месторождения не позволяют использовать исполнительный орган, выполняющий только одну функцию (копание, резание или удар). Использование нескольких исполнительных органов разного типа и назначения на одном сборщике в условиях подводной добычи влечет за собой увеличение количества операций, сложности управления, а также удорожания добычного комплекса.

Выбор технологического решения и параметров режима работы исполнительного органа подводного сборщика КМК, совмещающего в себе функции сбора и разрушения, позволит эффективно осуществлять отделение и сбор КМК с наименьшими потерями полезного компонента.

Основной целью данной главы является выбор схемного и технического решения подводного комплекса, включающего сборщиков с исполнительными органами для различных условий залегания КМК и разработка методики его расчета.

4.1 Конструкция добычного комплекса для рассредоточенных по дну массивов КМК

С точки зрения простоты конструкции и рентабельности сбора, для рассредоточенных и/или рассыпчатых КМК целесообразным является использование комплексов без отдельной транспортной системы, в которых устройство для сбора опускается и поднимается на тросе.

Представленный на рисунке 4.1 *а* комплекс состоит из судна обеспечения 1, кабель-троса специальной конструкции 2 и буксируемого устройства для сбора 3. Буксируемое устройство для сбора (рисунок 4.1, *б*) в свою очередь имеет исполнительные органы в виде камер разрежения 18, служащих для захвата КМК (или ЖМК) и погрузки их в накопительный бункер 7. Камеры разрежения имеют форму пластин, в которых создается разрежение (относительно внешнего) давления, которое прижимает к полостям в пластине полезное ископаемое.

Камеры разрезания двигаются с помощью рычажных механизмов 14 и гидроцилиндров 17.

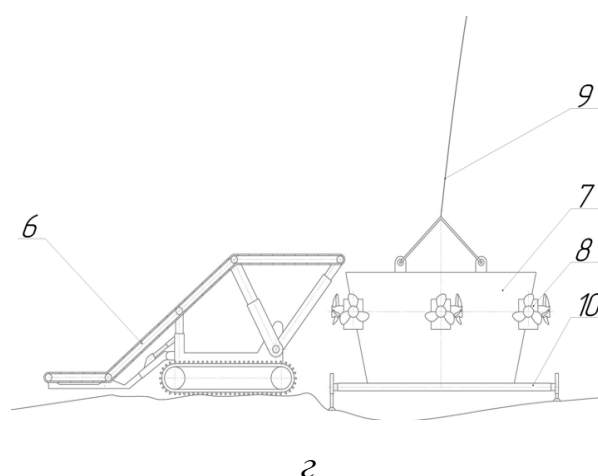
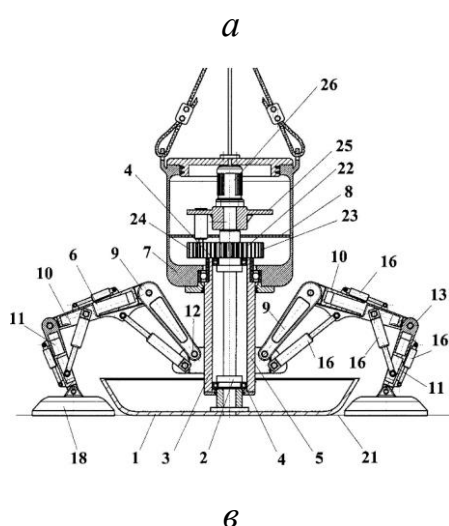
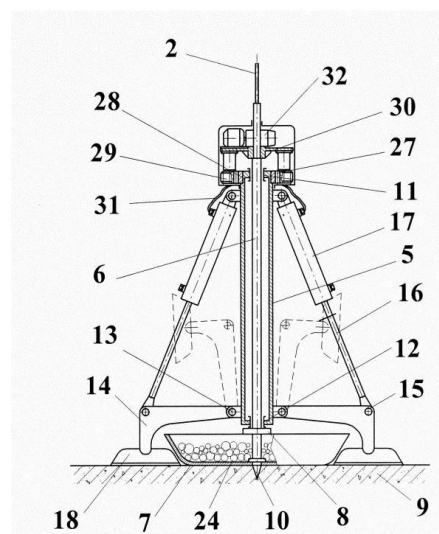
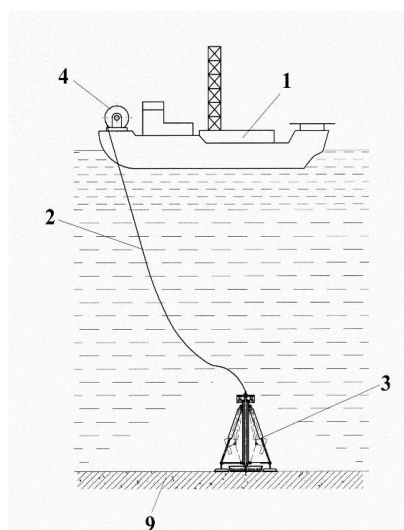


Рисунок 4.1 - Комплекс для сбора рассыпчатых ТПИ:

а - упрощенная схема комплекса; *б* - буксируемое устройство для сбора с камерами разрезания [15, 62, 110]; *в* - самоходный сборщик с камерами разрезания [60, 61]; *г* – узел загрузки в управляемую бадью на тросе

В качестве модернизации или дополнения данного комплекса возможно использование самоходного сборщика (рисунок 4.1, *в*). Его перемещение по дну происходит с помощью механизма шагания на рукоятях 9 [60]. Исполнительным органом также являются камеры разрезания 18, которые захватывают материал и перемещают его в накопительный бункер 1.

Производительность комплекса, как с буксируемым устройством для сбора, так и с самоходным сборщиком, будет определяться вместимостью бункера и скоростью подъема лебедки 4 на судне обеспечения.

Стоит отметить, что применение самоходного сборщика на более богатых месторождениях подразумевает использование в совокупности с различной транспортной системой, что избавит от необходимости спуско-подъемных операций всего сборщика после заполнения его накопительного бункера.

Например, возможно использовать схему транспортирования с помощью управляемой бады 7, в которую сборщик перегружает собранное полезное ископаемое через питатель 6 (рисунок 4.1, з). Бадья 7 опускается и поднимается на судно тросом 9, дополнительно ориентируясь подруливающими устройствами 8. Данная схема подъема актуальна при недостаточной поточности сбора полезных ископаемых, когда есть возможность тратить время не спуско-подъемные операции бады. Достоинства её заключаются в простоте технической реализации. К недостаткам стоит отнести: невозможность поточной добычи; требование к дополнительному устройству перегруза от сборщика.

Используя представленные выше наработки, разработана концепция глубоководной добычи рассыпчатых ТПИ с использованием канатно-скиповой системой (рисунок 4.2) или гидротранспортной системами подъема (рисунок 4.3), применение которой целесообразно для более капитальных и богатых месторождений.

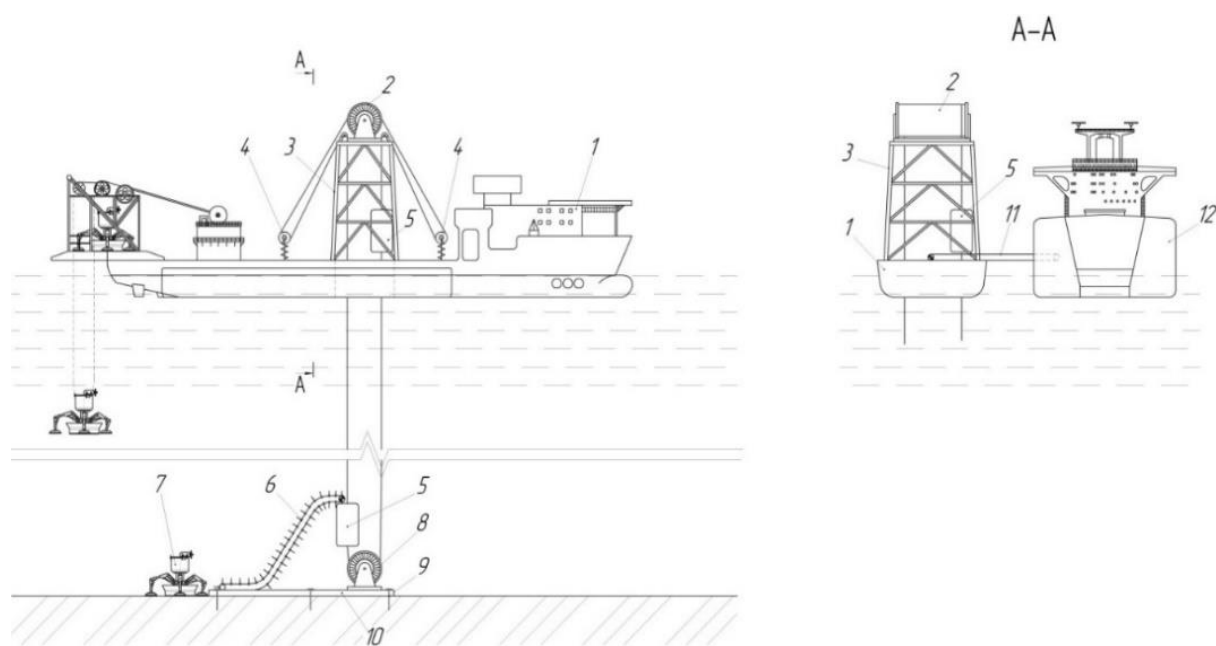


Рисунок 4.2 - Концепция глубоководной добычи рассыпчатых ГПИ [110]

Концепция представляет собой использование двух судов обеспечения *1* и *12*, канатно-скиповой подъемной установки *2* и шагающих сборщиков *7*. Подъемная установка имеет два сосуда (скипа) *5*, загрузка в которые осуществляется от сборщика через скребковый питатель *6*. При необходимости комплекс возможно дооснастить дробилкой, установленной перед питателем, для однородности погружаемой фракции.

Судно обеспечения *1* снабжено копром *3* с отклоняющими роликами *4* для компенсации вертикальных смещений каната. Сборщики *7* осуществляют добычу ПИ каждый на своей площади и перемещаются к загрузочной скиповой станции с помощью шагания на манипуляторах. Загрузочная станция скипового подъема включает в себя нижний шкив *8*, который подшипниковыми узлами связан с плитой *9*, удерживаемой на дне анкерами. Разгрузка скипов *5* осуществляется на судне *1* и посредством ленточного конвейера *11* перегружается на судно-баржу *12*.

При этом, на придонный загрузочный агрегат работают 2-6 шагающих сборщика, каждый из которых соединен кабель-тросом с распределительным устройством на дне.

В качестве управления используется сложная система телеметрии, с помощью которой согласуются все агрегаты добычного комплекса.

Основным недостатком такой системы подъема стоит выделить невозможность работы в водах с высоким уровнем волнения и качек. Возможны пути решения этого недостатка реализацией устройств компенсации качек, разработка которых на данный момент не производилась.

В качестве вертикального подъема также может применяться гидротранспортная система с диаметром става не менее 300 мм, промежуточными насосными станциями и многослойной трубой с «нулевой плавучестью», однако такие системы, недостаточно апробированы для больших глубин и до сих пор не имеют конструктивных решений следующих узлов: трубопроводный став; придонная система загрузки (данный вопрос частично решен работами А. Л. Вильмиса [18]).

При использовании самоходных шагающих сборщиков, узел перегрузки в гидротранспортную систему (рисунок 4.3) целесообразно размещать независимо от сборщиков и оснащать отдельным питателем 5, связанным со стационарным подводным бункером 7 трубой со шнеком 6. Погружаемое в бункер ПИ в виде пульпы транспортируется по ставу 9 насосами 10, поднимаясь на судно обеспечения.

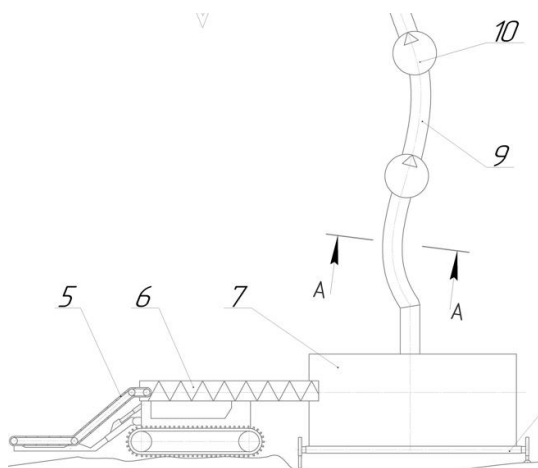


Рисунок 4.3 – Схема реализации гидротранспортной системы для предлагаемой в работе концепции

С целью снижения энергоемкости подъема, перспективным является направление с использованием промежуточной капсулы с атмосферным давлением, расположенной на расстоянии не более 100 м от района сбора [94, 95, 132]. В таком случае количество промежуточных насосов может быть снижено.

Главным преимуществом гидротранспортной системы - высокая производительность подъема и малое количество операций перегрузки.

Однако существуют следующие недостатки:

- необходимость предварительного дробления больших кусков полезного ископаемого;
- высокая степень отходов в виде транспортирующей пульпы;
- необходимость большого количества насосов, что подразумевает множество соединений и снижение надежности системы из жесткого трубопровода, а также высокие энергозатраты;
- высокие требования к свойствам трубопроводного става: высокая прочность наружного слоя трубы; низкое сопротивление перемещению внутреннего слоя трубы; гибкость и податливость без разрыва соединений; низкая масса всей системы трубопровода.

Поэтому, рекомендуется, в первую очередь отдавать предпочтения комплексам, использующие канатную транспортную систему.

4.2 Расчет технологического оборудования для глубоководной добычи с канатным подъемом

Система скипового подъема в совокупности с добычным агрегатом с камерами разряжения была проанализирована, рассчитана, анализ показал следующее:

1) оптимальным, по условию минимального числа перестановок камер для отработки всей площади, будет использование камер разрежения диаметром 1,5 м (рисунок 4.4), что позволит достичь производительности 40 т/ч, при условии, что объем накопительного коллектора будет равен - 50 м³;

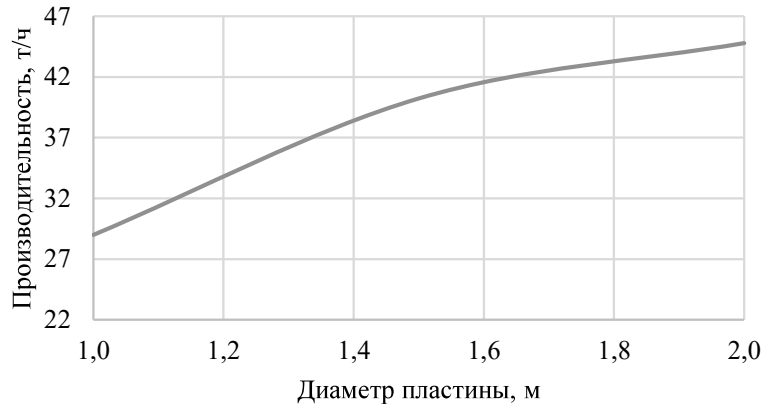


Рисунок 4.4 - График зависимости производительности агрегата от диаметра пластин

2) скиповой подъем, состоящий из двух сосудов, объемом по 100 м^3 при выборе каната достаточной прочности, способен достичь производительности 255 т/ч, при одновременной загрузке/разгрузке ПИ и уравновешенном движении сосудов со скоростью 10 – 50 м/мин (0,17 – 0,84 м/с) (рисунок 4.5);

3) загрузка промежуточного бункера состоит из 10 – 12 перегрузок камер разрежения и составит 1 – 5 минут, при этом в емкость загружается до 2 тонн ПИ, перемещение на новое место стояния составит 5 минут, таким образом, за 1 час может быть собрано 10 – 20 тонн ПИ, а для сбора 80 тонн ПИ потребуется 4 – 5 сборщиков и специальные средства для перегрузки ПИ от сборщика в скип;

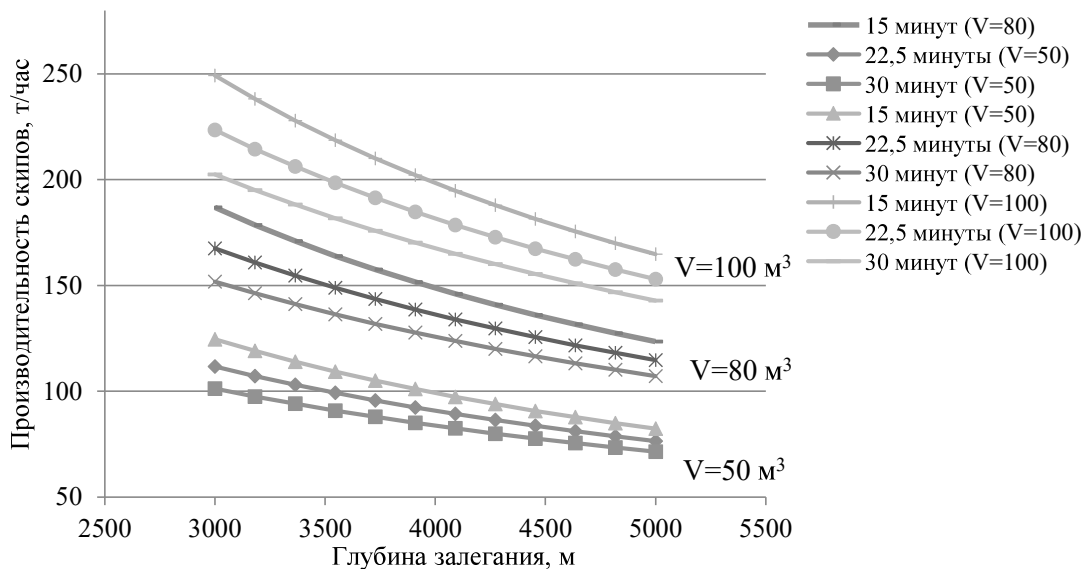


Рисунок 4.5 - Зависимость производительности скипов разного объема от глубины залегания КМК и времени на погрузку/разгрузку

4) цикл загрузки скипа, подъема на судно и разгрузки будет занимать от 30 до 60 минут в зависимости от глубины транспортирования и времени на загрузку,

а общее время цикла добычного агрегата с момента начала работ до разгрузки коллектора в скип составит 3,5 часа.

4.3 Концепция глубоководной добычи однородных массивов КМК

Для случаев, когда КМК находятся в наиболее встречаемом состоянии, в виде однородной залежи - разработан вариант концепции сбора КМК с использованием универсального самоходного сборщика, исполнительные органы которого заменяются для каждого из видов полезного ископаемого, а также используются в качестве передвижения способом шагания (рисунок 4.6). Компоновка, количество исполнительных органов, их оснащение, а также окончательные геометрические параметры сборщика уточняются силовым расчетом и технико-экономическим обоснованием.

Судно обеспечения *1* с двумя лебедками, расположенных на носу и корме, приплывает к месту для разработки полезных ископаемых. Первоначально на тросах опускаются самоходные платформы *2*, на гусеничном ходу, которые имеют домкраты для горизонтирования. С помощью дистанционного управления платформы перемещают на необходимое место и горизонтируют.

Далее на одну из платформ опускается вспомогательное оборудование вместе с самоходным агрегатом для сбора (сборщиком) *13*. Вспомогательное оборудование включает в себя трансформатор *3*, маслостанцию *4* и лебедку *5*. Связь сборщика с вспомогательным оборудованием осуществлена через лебедку *5*, на которую намотан кабель-шланг *12* для питания сборщика электро-гидро-энергией. Питание и связь вспомогательного оборудования от судна происходит через высоковольтный кабель-трос *10*.

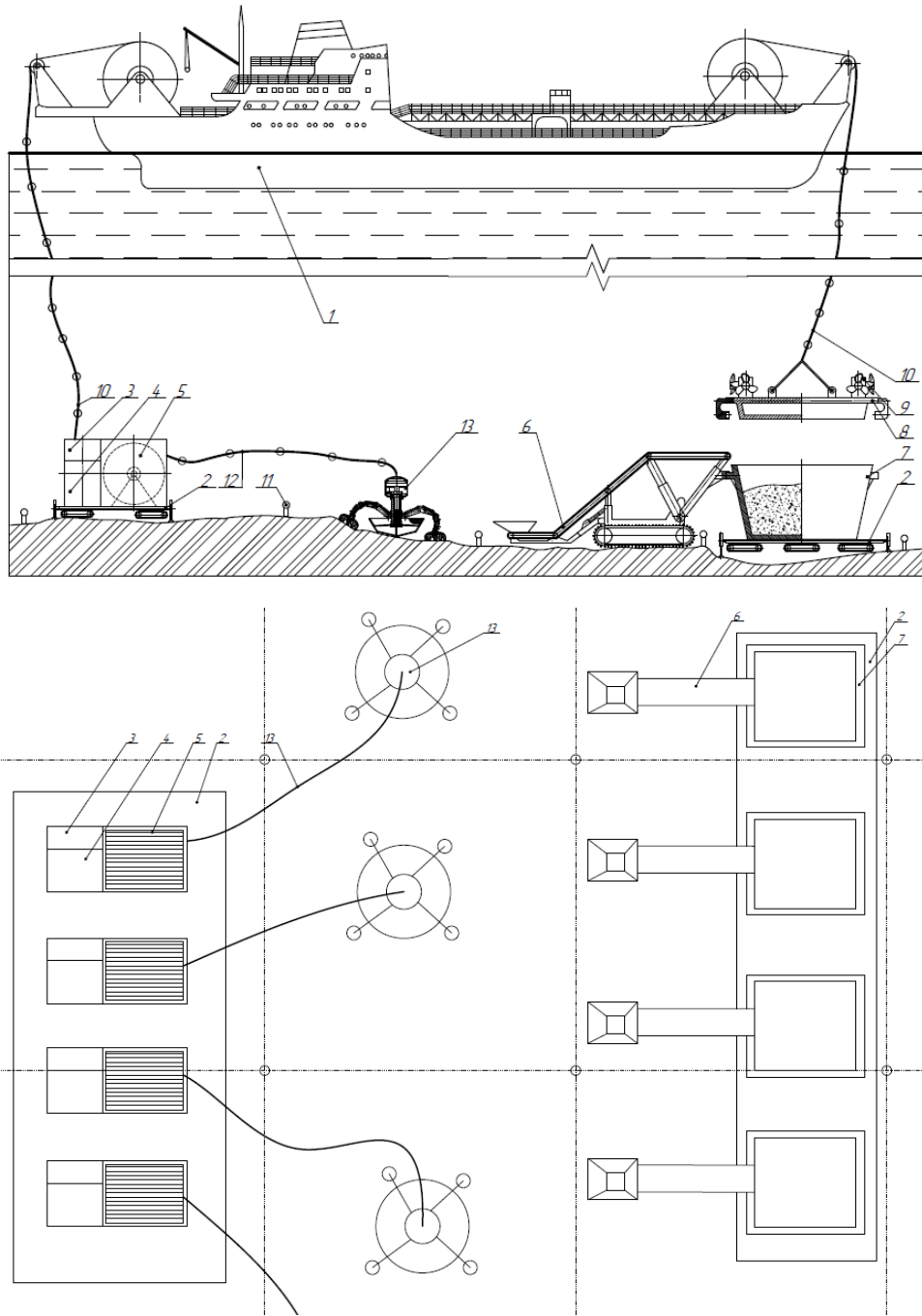


Рисунок 4.6 - Концепция сбора однородных массивов КМК

Далее, опускается самоходный пластинчатый питатель 6, который имеет возможность регулировать угол его наклонной части. На вторую из платформ опускается бадья (или бункер) 7, для перегрузки из промежуточного бункера сборщика в нее собранного полезного ископаемого. Питатель и бадья устанавливаются так, чтобы был соединен замок, для исключения просыпания груза при перегрузке. Сборщик осуществляет сбор и перегрузку полезного ископаемого на питатель с помощью грейферного исполнительного органа со

встроенным ударником.

Опускание и подъем бадьи осуществляется с помощью приспособления для захвата 8. Приспособление имеет рулевые винты 9, которые осуществляют необходимое позиционирование при опускании и подъеме таким образом, чтобы ось бадьи совпадала с осью приспособления для захвата, а оси подвижных замков совпадали с осями выступов на бадье.

Приспособление для захвата имеет два подвижных замка и выполняет, по сути, функцию крышки (имеется выступающая часть конусной формы, которая повторяет полость бадьи). При опускании приспособления для захвата внешний конус выступающей части и внутренний конус полости бадьи центрирует приспособление, исключая непопадание подвижных замков.

Поднятое полезное ископаемое перегружается из бадьи в корабельный бункер, предварительно обогащается, путем отделения жидкой части собранного материала и осушения его. Дальнейшее транспортирование возможно с использованием дополнительного судна в виде баржи, на которую перегружается осушенное полезное ископаемое или же самим кораблем обеспечения.

Позиционирование и ориентация всех агрегатов и устройств происходит с помощью приемо-передатчиков, расставленных с определенным шагом, образуя координатную «сетку». Все сигналы с приемо-передатчиков проходят через центральный блок управления, находящийся на корабле обеспечения, который подает ответные сигналы управления на приемо-передатчики, а они в свою очередь пересылают сигналы на узлы и агрегаты, участвующих в сборе полезных ископаемых.

Данная концепция является вариативной и может быть использована с различными агрегатами для сбора, а также системой транспортировки полезного ископаемого на поверхность.

4.4 Конструкция глубоководного сборщика КМК с грейферным исполнительным органом с ударником по оси ковша

Для представленной на рисунке 4.6 концепции сбора, предлагается

использовать подводный сборщик с заменяемым исполнительным органом, в зависимости от условий залегания КМК. Для однородных КМК разработана, обоснована, а также теоретически и экспериментально испытана конструкция грейферного исполнительного органа со скалывающим узлом.

Подводный сборщик с грейферным исполнительным органом со скалывающим узлом (рисунок 4.7) имеет 4/6 манипулятора *1*, которые совмещают функции перемещения и опоры, обеспечивая устойчивость устройства на склонах и сложных рельефах. Каждый из манипуляторов снабжен грейферным исполнительным органом *10*, причем некоторые из них могут быть снабжены скалывающим узлом *9*, для предварительного разрыхления массива КМК. Разрыхленная масса собирается и временно загружается в бункер *2*.

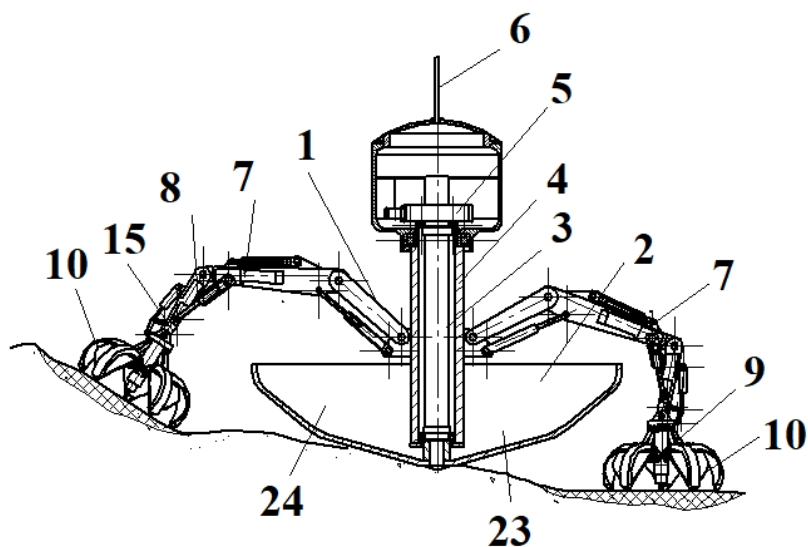


Рисунок 4.7 – Прототип глубоководного сборщика с грейферным исполнительным органом [63, 107, 111]

Позиционирование исполнительных органов осуществляется гидроцилиндрами *8* и рычажными механизмами *7*, закрепленных на манипуляторах. Грейферный ковш на манипуляторе закреплен через шарнир и поворачивается рычажной системой *15*, а раскрытие челюстей осуществляется гидроцилиндрами *9*.

В зависимости от схемы сбора, исполнение скалывающего элемента возможно двумя способами. Один из вариантов использования скалывающего

узла в грейферном исполнительном органе является установка ударника в центр ковша (рисунок 4.8).

При таком исполнении, разупрочнение массива и предварительное его разрыхление осуществляется пикой 16, совершающей возвратно поступательные движения внутри корпуса 19 после совершения удара по ней поршнем-ударника 17. Движение поршня-ударника происходит созданием рабочего давления жидкости в полости 18. При этом челюсти 11 ковша 10 находятся в раскрытом состоянии и начинают смыкаться гидроцилиндрами 8 после разупрочнения массива и воспринимают на себе усилие резания корки КМК. Прижатие исполнительного органа происходит манипулятором 15.

Такая конструкция позволяет обеспечить максимальное заполнение ковша, так как грейфер не будет испытывать значительных усилий сопротивления смыканию, а также высокое дробление собираемого материала, что благоприятно скажется на его транспортировке.

Недостатком стоит отметить – сложное управление исполнительным органом и увеличенное время цикла сбора одного ковша.

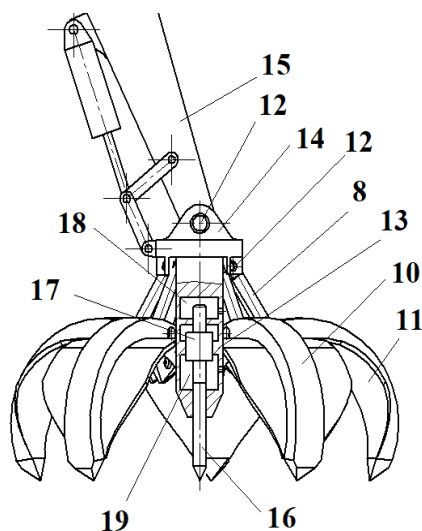


Рисунок 4.8 – Вариант исполнения скалывающего узла внутри грейферного ковша [63]

4.5 Конструкция грейферного исполнительного органа с встроенным ударником в челюсти ковша

Другим вариантом исполнения скалывающей функции грейферным ковшом является применение грейфера с активными челюстями (рисунок 4.9) и использование тем самым комбинированной схемы сбора, исследованной в

разделе 2.5.

Для этого также следует использовать многочелюстной гидравлический грейфер закрытого типа для жидко-сыпучих материалов. Работой гидроцилиндров закрытия, челюсти грейферного ковша *1* внедряются в массив и закрываются с наложением ударных импульсов встроенным ударником *2*.

Режущим элементом такого ковша является зубья *4* клиновидной формы, которые совершают возвратно поступательные движения и передают ударный импульс.

Работа встроенного гидроударника осуществляется следующим образом. Поршень-ударник *3* совершая возвратно поступательные движения производит удар по хвостовику зуба *4*, который в свою очередь перемещается во втулке *7*. При передвижении поршня-ударника рабочая жидкость попеременно переходит из полостей *8* и *5* через каналы во втулке *11* и регулируется гидроаккумулятором *9*. Таким образом возможно совершать как одиночный удар, так и серию ударов путем включения и выключения гидроударника в процессе внедрения и дальнейшего смыкания челюстей грейферного исполнительного органа.

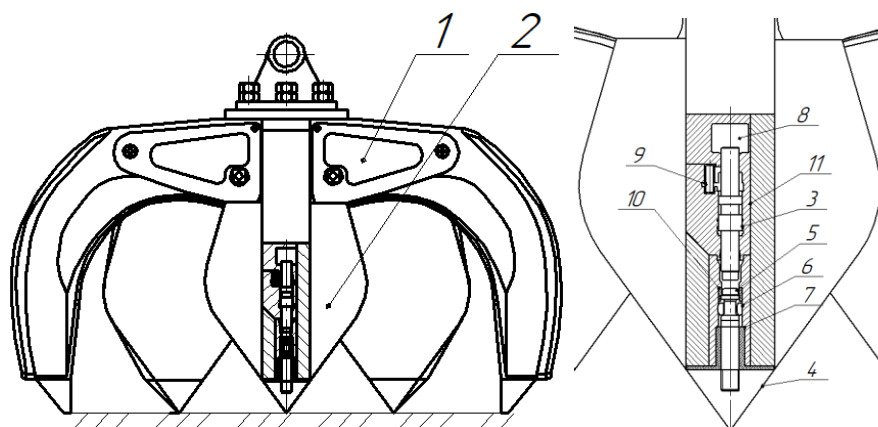


Рисунок 4.9 – Вариант исполнения грейферного ковша с активными челюстями

Преимуществом такой конструкции будет являться минимальное время цикла сбора одного ковша, а также увеличенные показатели экологичности, так как процесс сбора не будет сопровождаться большим количеством замутнения и повреждением субстрата рудной части КМК.

Технико-экономическое обоснование (ТЭО) повышения производительности грейферного ковша со встроенным ударником в настоящее

время не может быть составлено, так как отсутствуют конкретные данные по стоимости узлов оборудования и особенности их применения на морском дне.

4.6 Алгоритм оценки функционирования комплекса, включающего подводный сборщик

В соответствии с представленным в разделе 2.1 порядком расчета подводного сборщика, теоретическими исследованиями и экспериментально полученными данными, а также рассмотренными выше концепциями сбора КМК для различных условий их залегания, алгоритм выбора и расчета комплекса, включающего подводный сборщик шагающего типа, в укрупненном виде, может быть изображен в виде блок-схемы, представленной на рисунке 4.10.

В соответствии с алгоритмом выбора, рассмотрим подробно расчет параметров грейферного исполнительного органа со встроенным ударником, с выходом на производительность ИО и сборщика в целом.

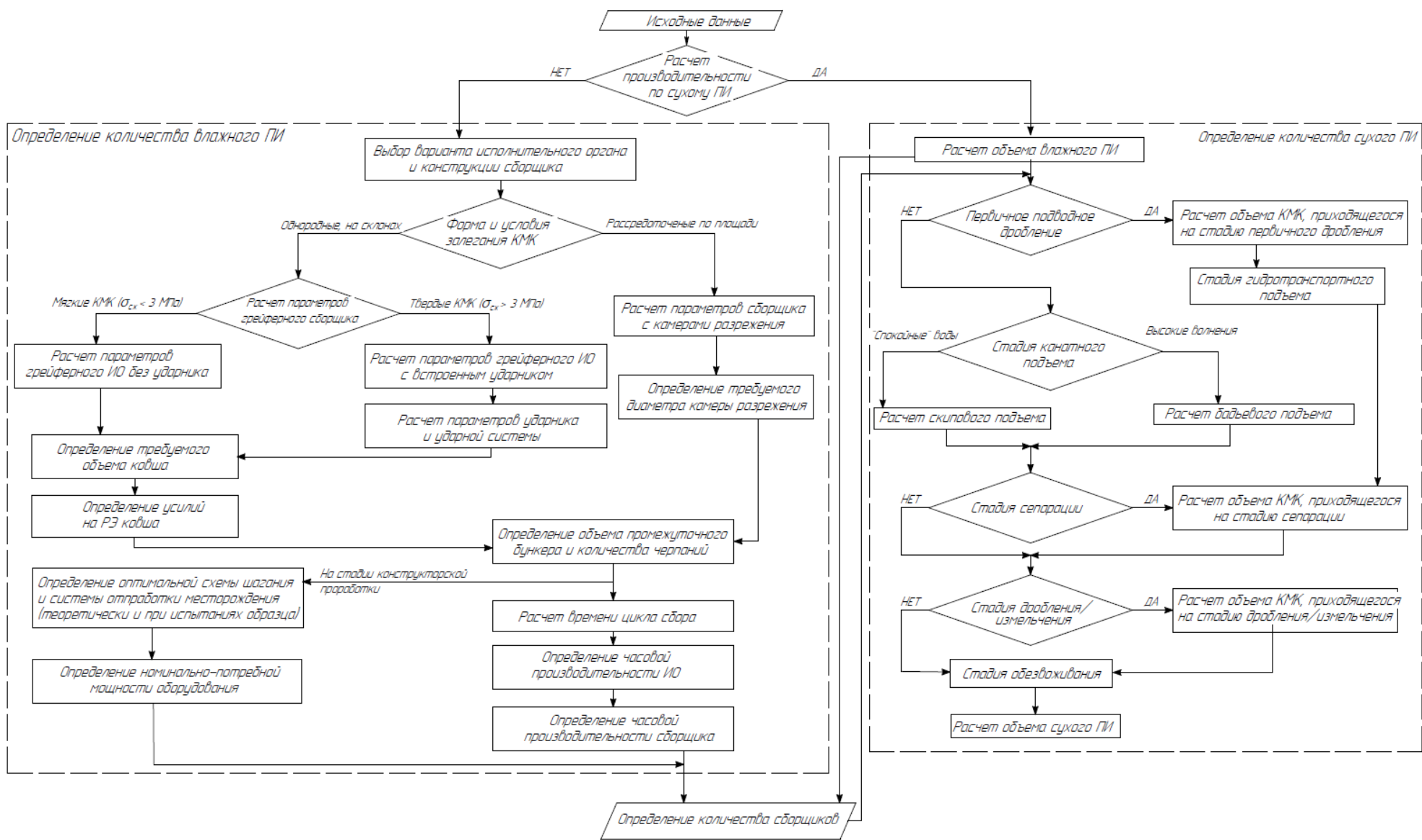


Рисунок 4.10 – Алгоритм расчета производительности комплекса, включающего подводный сборщик шагающего типа

4.6.1 Определение параметров грейферного ковша.

Исходя из мощности рудного слоя КМК, определяется оптимальный объем ковша при условии его максимального заполнения за одно черпание.

Так как в зависимости от твердости рудной части КМК, схема зачерпывания может отличаться, предположим, что форма скола будет представлять половину эллипсоида (рисунок 4.11), малая полуось r_1 которого является глубиной скола, а большая полуось r_2 – половина ширины захвата грейфера. Тогда, при условии заполнения ковша за одно черпание глубина скола должна соответствовать условию (4.1):

$$r_1 = \sqrt{r_2^2 - \frac{r_2^2}{2}} \leq h_k, \quad (4.1)$$

где r_2 – половина ширины захвата грейфера, $r_2 = B/2$, м;

r_1 - глубина скола, соответствующая мощности слоя КМК, $r_1 = h_k$.

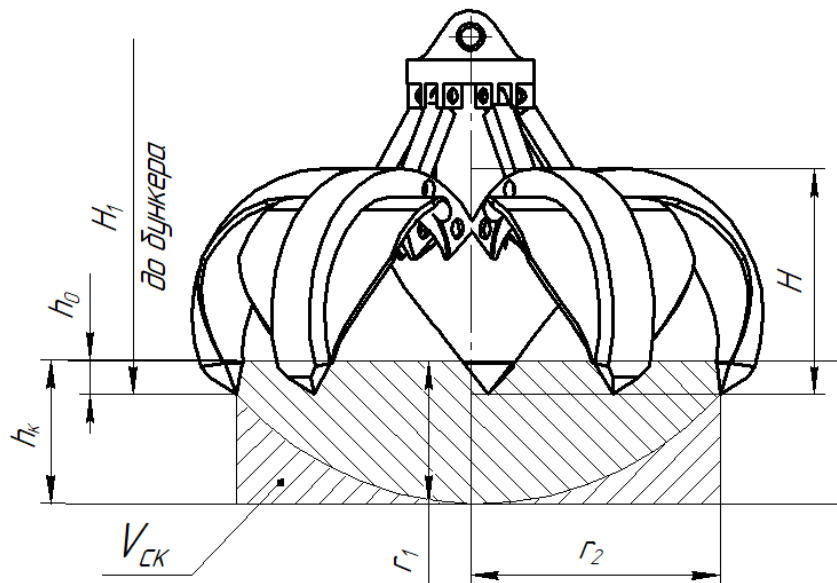


Рисунок 4.11 - Геометрические параметры скола грейфера

Задавшись мощностью слоя рудной части КМК, ширина захвата грейфера определяется из выражения (4.2):

$$B = \frac{h_k}{0,26}. \quad (4.2)$$

При смыкании челюстей с места стояния, для корок в виде разрыхленной массы, объем собранного материала будет составлять половину эллипса и

находится по формуле (4.3):

$$V_{\text{ск1}} = \frac{\pi B^2}{6} h_{\text{к}}. \quad (4.3)$$

В случае, когда КМК представляют однородный массив челюсти сначала заглубляться, а затем смыкаются по линии соединения КМК с подложкой, поднимая при этом ковш вверх, тогда скол будет иметь форму цилиндра, объем которого определяется по формуле (4.4):

$$V_{\text{ск2}} = \frac{\pi B^2}{4} h_{\text{к}}. \quad (4.4)$$

По предварительно рассчитанному объему ковша, рассчитывается объем бункера сборщика, который будет зависеть от количества черпаний на одном месте стояния. Количество собираемых ковшей на одном месте стояния находится графическим способом (рисунок 4.12).

$$V_{\text{с}} = (22 + 15 + 12) \times 0,7 \text{ м}^3 = 34,3 \text{ м}^3$$

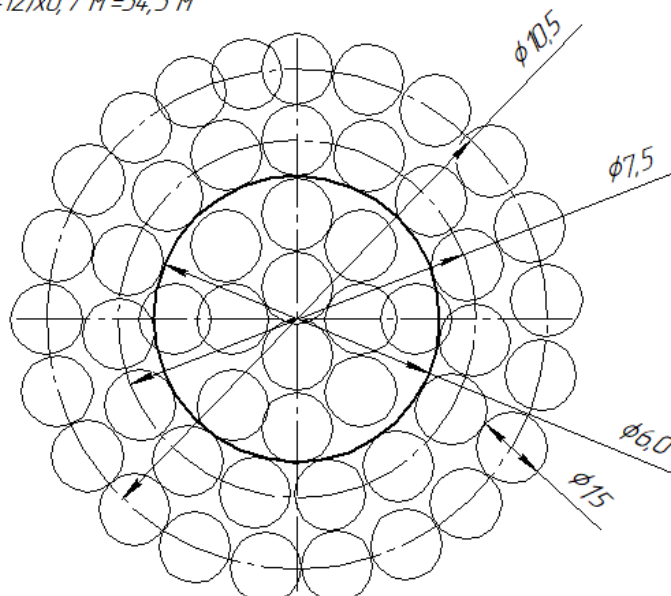


Рисунок 4.12 – Схема сбора участка на одном месте стояния

На рисунке 4.12 представлен пример графического определения количества возможных черпаний, при бункере, диаметром 6,0 м и диаметре ковша 1,5 м. Показано, что объем требуемого бункера должен составлять не меньше 49 объемов ковша (количество черпаний).

Подобное решение задачи для различных объемов ковша и количества черпаний позволило построить график зависимости объема промежуточного бункера сборщика от объема грейфера (рисунок 4.13).

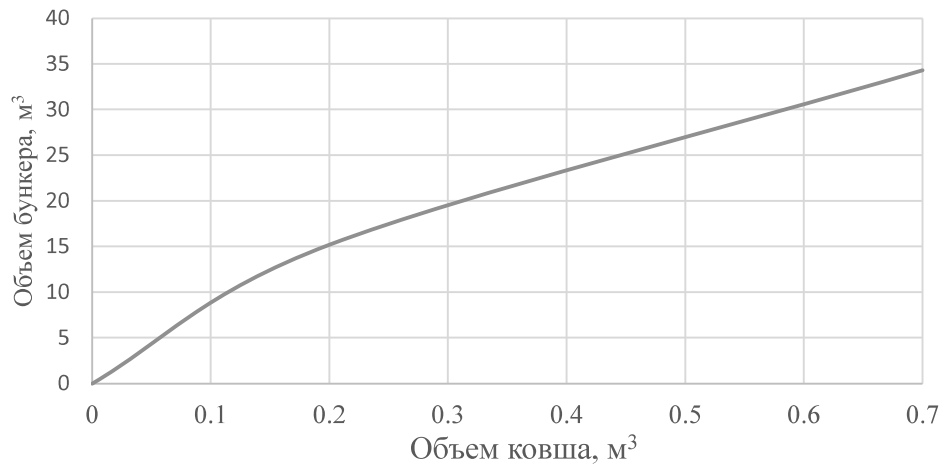


Рисунок 4.13 – График зависимости объема бункера от объема ковша

Зная объем ковша и объем промежуточного бункера, количество черпаний определяется по формуле (4.5):

$$n = \frac{V_б}{V_{гр}}, \quad (4.5)$$

где $V_б$ – объем бункера, м³;

$V_{гр}$ – объем грейферного ковша.

Окончательные размеры диаметра и высоты бункера определяются в ходе конструкторских изысканий.

4.6.2 Определение усилий на режущих элементах грейферного ковша

Глубина начального внедрения от усилия подачи грейфера определяется графическим методом, построив каждое уравнение системы (2.21).

Дальнейшее заглубление от смыкания челюстей будет зависеть от преодоления челюстями удельной силы сопротивления смыканию, которая определяется из выражения (2.27). При следующих параметрах: массе грейфера $m_{гр} = 150$ кг; пределу прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 5,87$ МПа; коэффициенте трения $\mu = 0,32$; высоте грейфера $H \approx B$ – график зависимости удельной силы сопротивления смыканию челюстей от глубины внедрения примет вид, представленный на рисунке 4.14.

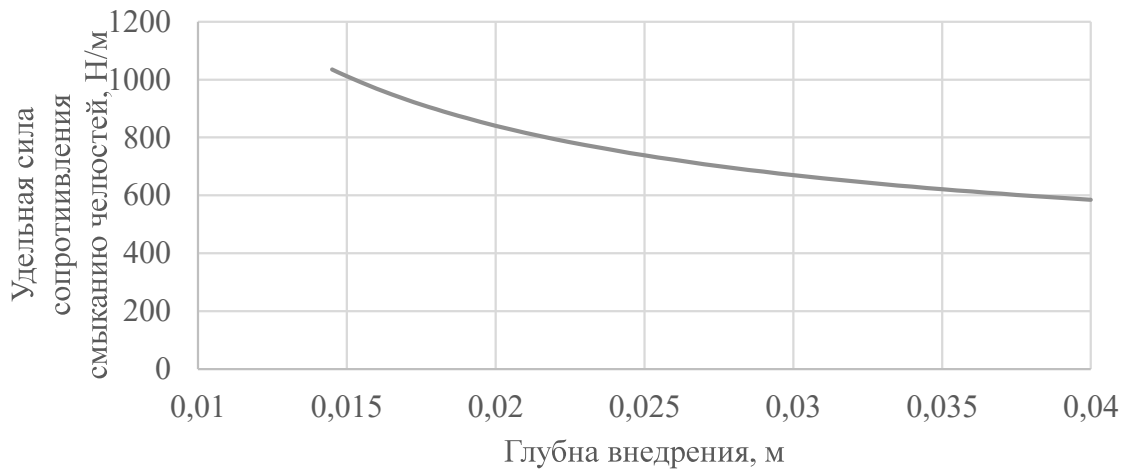


Рисунок 4.14 – График зависимости удельной силы сопротивления смятию челюсти, приведенной к режущей площади РЭ, от длины режущей кромки после начального заглубления

Анализ графика показывает, что максимальная удельная сила сопротивления смятию челюстей будет в момент начала закрытия грейфера и условие для сбора КМК будет преодоление этого максимального значения усилием гидроцилиндров.

4.6.3 Расчет параметров ударника

Рациональные параметры встроенного ударника, рассчитываются исходя из требуемой энергии удара $A_{уд}$. Зависимость параметров поршня-ударника от энергии удара описывается выражением (2.35). При этом длина и площадь сечения поршня-ударника, исходя из размера челюсти грейферного ковша, в которую встраивается ударник, определяется по графику зависимости длины поршня-ударника от его скорости в пределах 5-10 м/с (рисунок 4.15).

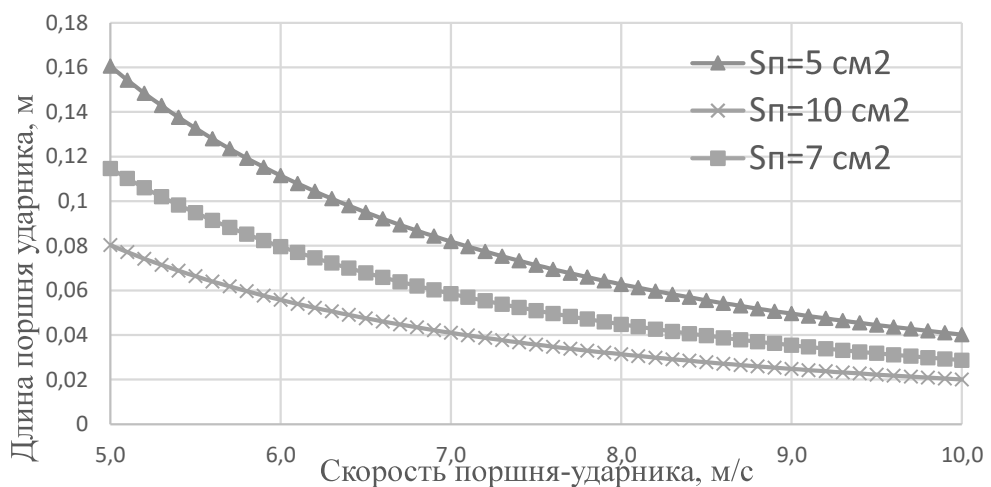


Рисунок 4.15 – График зависимости длины поршня от его скорости при энергии удара 7...10 Дж

Масса поршня-ударника определяется из выражения (4.6):

$$m_1 = \frac{2A_{уд}}{\vartheta_{уд}^2}. \quad (4.6)$$

Требуемое давление в системе, выраженное из уравнения (2.36), определяется по формуле (4.7):

$$p_0 = \frac{m_1 \vartheta_{уд}^2}{0,656 S_{\Gamma} g S_n}, \quad (4.7)$$

где p_0 – давление рабочей жидкости, кг/м²;

S_{Γ} – ход поршня, м;

m_1 – масса поршня, кг; $m_1 = 2A_{уд}/\vartheta_{уд}^2$.

При комбинированной схеме сбора суммарная величина начального внедрения находится по формуле (4.8):

$$h_0 = h_{0вн} + h_{0уд}, \quad (4.8)$$

где $h_{0вн}$ – глубина начального внедрения от усилия подачи ИО, определяется по выражению (2.20), м;

$h_{0уд}$ – глубина внедрения от единичного удара, определяется из выражения (2.37), м.

Тогда удельная сила сопротивления смыканию челюстей грейфера с учетом увеличенной глубины первоначального внедрения от ударной нагрузки описывается выражением (4.9):

$$F_{ч.уд} = \frac{(m_{гр} g k_A + \sigma_{сж} h_0 l \mu) H}{h_0 l}. \quad (4.9)$$

где l – длина режущей кромки инструмента, м.

4.6.4 Расчет производительности сборщика

Теоретическая производительность грейферного ИО рассчитывается по формуле (4.10):

$$Q_{теор} = \frac{3600 V_{гр} K_3}{T_{ц} K_y}, \text{ м}^3 / \text{час}, \quad (4.10)$$

где $T_{ц}$, – время цикла сбора одного ковша, с;

K_y - коэффициент корректировки, учитывающий замедление движений в воде,

$K_y=1,5$;

K_3 – коэффициент заполнения грейфера, $K_3 = 0,8$.

В свою очередь время цикла может быть найдено по формуле (4.11):

$$T_{ц} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6, \quad (4.11)$$

где t_1 – время внедрения ковша, с;

t_2 - время смыкания челюстей, с;

t_3 – время подъема ковша, с;

t_4 – время опорожнения ковша, $t_4 \approx 2$ с;

t_5 – время на поворот манипулятора и другие операции позиционирования ковша перед опусканием, $t_4 \approx 5$ с;

t_6 – время опускания ковша, с.

Время внедрения ковша определяется по формуле (4.12):

$$t_1 = \frac{h_0}{v_{п}}, \quad (4.12)$$

где $v_{п}$ – скорость подачи ковша, м/с.

Время смыкания челюстей находится из выражения (4.13):

$$t_2 = \frac{L}{v_{см}}, \quad (4.13)$$

где $v_{см}$ – скорость смыкания челюстей, м/с;

L – путь, пройденный челюстью при смыкании, четверть эллипса или сумма сторон прямоугольника, м.

При форме скола в виде цилиндра, путь прохождения челюстью при смыкании рассчитывается по формуле (4.14):

$$L = \frac{B}{2} + h_{к}, \text{ м.} \quad (4.14)$$

Скорость движения челюстей при комбинированной схеме сбора рассчитывается по выражению (2.38):

Время на подъем и опускания грейфера будет одинаковое и рассчитывается по формуле (4.15):

$$t_3 = t_6 = \frac{H_1}{v_{п}}, \quad (4.15)$$

где H_1 – высота от почвы до высоты разгрузки ковша, равная высоте бункера, м.

Расчетную часовую производительность одного сборщика с грейферным исполнительным органом со встроенным ударником в челюсть вычислим по формуле (4.16):

$$Q_{\text{расч}} = \frac{3600\rho V_{\text{б}}}{(T_{\text{ц}}n + T_{\text{дв}} + T_{\text{разгр}} + T_{\text{пер}})}, \text{ т/ч}, \quad (4.16)$$

где $\rho_{\text{к}}$ – плотность КМК;

$V_{\text{б}}$ – объем промежуточного бункера;

n – количество черпаний требуемое для наполнения бункера;

$T_{\text{дв}}$ - время передвижения к узлу перегрузки, $T_{\text{дв}} \leq 300$ с;

$T_{\text{разгр}}$ - время выгрузки бункера на перегружатель $T_{\text{разгр}} \leq 300$ с;

$T_{\text{пер}}$ - время передвижения на прежнее или новое место сбора, $T_{\text{пер}} \leq 300$ с.

Время перехода к бункеру, разгрузки и переходу обратно зависит от выбора конкретной системы разработки и расположения оборудования на месте отработки месторождения. Оптимальные значения затрат времени на эти операции должно быть в пределах 5 мин.

По приведенному выше порядку расчета построен графи зависимости производительности сборщика от мощности слоя рудной части КМК (рисунок 4.16).

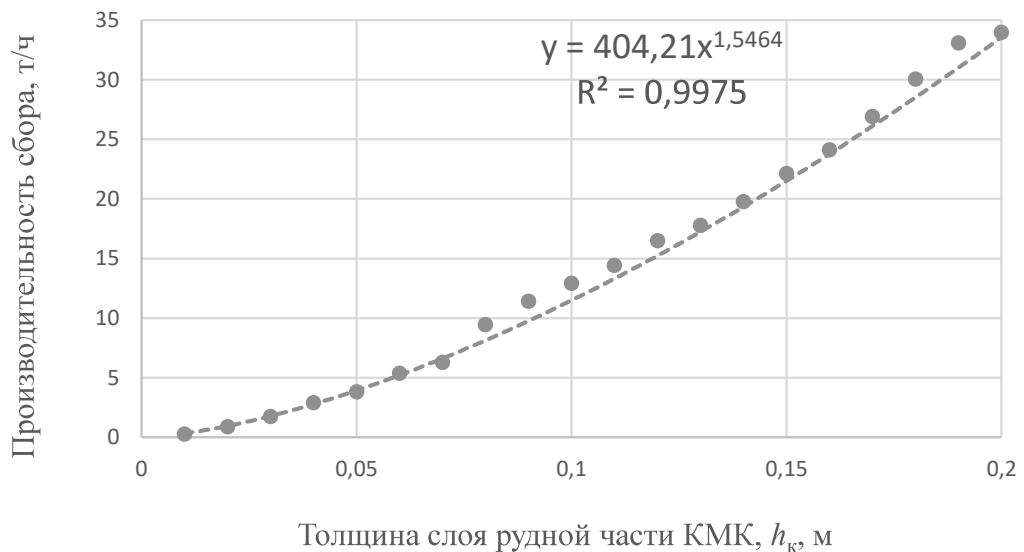


Рисунок 4.16 - График зависимости производительности сбора от величины слоя рудной части КМК

Согласно алгоритму (рисунок 4.10), завершающая часть расчета заключается в сравнении полученной производительности сбора, рассчитанной для конкретных условий добычи (мощности слоя КМК) с заданной потребностью в собираемом материале и определяют количество сборщиков для обеспечения заданной потребности.

4.7 Выводы по главе 4

1. Разработана и обоснована конструкция подводного сборщика КМК с исполнительным органом в виде камер разрежения, позволяющее осуществлять сбор рассыпчатых месторождений КМК.

2. Разработана и обоснована конструкция подводного сборщика КМК с грейферным исполнительным органом и встроенным гидроударником по оси и/или в челюстях ковша, позволяющее осуществлять сбор однородных массивов КМК с высокими прочностными свойствами с низким разубоживанием.

3. Разработана и обоснована концепция добычного комплекса, включающая шагающего сборщика с возможностью замены исполнительного органа для конкретных условий залегания КМК, а также транспортную систему в виде бадьевого подъема, которая в зависимости от системы отработки месторождения и капитальности его запасов, может заменяться на гидротранспортную систему или скиповой подъем.

4. Для оценки функционирования добычного комплекса в рамках представленной концепции, разработан алгоритм расчета его производительности при выборе того или иного набора оборудования, позволяющий определить, что, например, при использовании конструкции шагающего сборщика с грейферным исполнительным органом и встроенным ударником в челюстях при толщине рудного слоя корок 50-100 мм время цикла сбора составит до 15 с, а его производительность до 13 т/ч влажных корок.

5. Установлена экспоненциальная зависимость производительности сбора от толщины рудного слоя КМК, описываемая степенным выражением $y = 404,21x^{1,54}$.

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 кобальтоносных железомарганцевых корок в условиях сложного рельефа дна океана, что вносит значительный вклад в развитие горной отрасли страны.

По результатам выполненной 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 транспонирования 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 начального внедрения в 1,5 раза при наложении ударной нагрузки 7...10 Дж на режущие элементы грейферного исполнительного органа для рудного слоя 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 корок 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 (патент № 2659045, № 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 органом и встроенными в челюсти гидродарниками 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 (приложение А).

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

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТПИ – твердые полезные ископаемые;

ПИ – полезные ископаемые;

ЖМК – железомарганцевые конкреции;

КМК – кобальтоносные железомарганцевые корки;

ГПС – глубоководные полиметаллические сульфиды;

ВТМ – выемочно-транспортирующие машины;

ГЗУ – грузозахватные устройства;

ИО – исполнительный орган;

РЭ – режущие элементы;

ММ – математическая модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев, Н. А. Гидроподъем полезных ископаемых со дна морей и океанов посредством корпусносекционных турбомашин / Н. А. Алиев, С. Г. Акопов, В. А. Джангиров, В. П. Шулико. – Мариуполь.: НТБ ПГТУ, Теория и практика металлургии, № 5–6, 2009.
2. Алимов, О. Д. Расчет динамического внедрения инструмента в обрабатываемую среду / О. Д. Алимов, В. К. Манжосов, В.Э. Еремьянц, Ю.В. Невенчаный. – Фрунзе: Изд-во Илим, 1980. – 44 с.
3. Алимов, О. Д. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах / О. Д. Алимов, В. К. Манжосов, В.Э. Еремьянц. – М.: Наука, 1985. – 360 с.
4. Андреев, С. И. Металлогения железомарганцевых образований Тихого океана. СПб.: Недра, 1994. – 191 с.
5. 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.
6. Андреев, С. И. Минеральные ресурсы Мирового океана: концепция изучения и освоения (на период до 2020 г.). СПб.: ВНИИОкеангеология, 2007.
7. Ануфриев, Г. С. Космическая пыль в океане / Г. С. Ануфриев, Б. С. Болтенков // Природа. 2000. № 3. с. 21–28.
8. Баладинский, В. Л. Машины и механизмы для подводных работ / В. Л. Баладинский, В. А. Лобанов, Б. А. Галанов. – Л.: Судостроение, 1979. – 192 с.
9. Барон, Л. И. Экспериментальные исследования процессов разрушения горных пород ударом / Л. И. Барон, Г. М. Веселов, Ю. Г. Коняшин. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 217 с.
10. Батурич, Г. Н. Рудный потенциал океана // Природа № 5 2002.
11. Батурич, Г. Н. Руды океана. М., Наука, 1993. – 303 с.
12. Бегагоен, И. А. Бурильные машины / И. А. Бегагоен, И. Г. Дядюра, А. И. Бажал. – М.: Недра, 1972. – 368 с.
13. Берон, А. И., Резание угля / А. И. Берон, А. С. Казанский, Б. М. Лейбов,

- Е. З. Позин. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 439 с.
14. Боженков, Ю. А. Самоходные необитаемые подводные аппараты / Ю. А. Боженков, А. П. Борков, В. М. Гаврилов. – Л.: Судостроение, 1986. – 264 с.
15. Бородкин, Э. О. Устройство для сбора железомарганцевых конкреций с механизмом шагания / Э. О. Бородкин, **Р. И. Королев** // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019. Сборник научных трудов. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. – 2019. – С. 69–76
16. Бреслав, Л. Б. Техничко-экономические обоснования средств освоения Мирового океана. – Л.: Судостроение, 1982. – 240 с.
17. Ветров, Ю. А. Резание грунтов землеройными машинами. – М.: Машиностроение, 1971. – 349 с.
18. Вильмис, А. Л. Обоснование технологии глубоководного гидроподъема железомарганцевых конкреций загрузочными аппаратами с минимальным негативным воздействием на окружающую среду: дис. ... докт. техн. наук: 25.00.22 / Вильмис Александр Леонидович. – Москва, 2021. – 190 с.
19. Гурвич, Е. Г. Металлоносные осадки Мирового океана. – М.: Научный мир, 1998. – 340 с.
20. Гурин, М. А. Динамические характеристики мерзлого грунта при разрушении его виброударным забойным инструментом // Изв. АН СССР, сер. Мех. – 1955. – с. 36–38.
21. Голева, Р. В. К проблеме изучения и освоения минерально-сырьевых ресурсов Мирового океана // Рациональное освоение недр. № 1. 2010. – с. 53–42.
22. Грейнер, Л. Гидродинамика и энергетика подводных аппаратов / Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978. – 384 с.
23. Дж. Меро. Минеральные богатства океана. – М.: Прогресс, 1969. – 440 с.
24. Дмитриев, А. Н. Проектирование подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1978. – 234 с.
25. 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.
26. Добрецов, В. Б. Освоение минеральных ресурсов шельфа. – Л.: Недра, 1980. – 272 с.
27. Добрецов, В. Б. Мировой океан и континентальные водоемы: минеральные ресурсы, освоение, экология / В. Б. Добрецов, В. А. Рогалев, Д. С. Опрышко. – СПб.: Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы, 2007. – 796 с.
28. Ефимова, А. И. Общий физический практикум физического факультета МГУ. Погрешности эксперимента: Учебно-методическое пособие / А. И. Ефимов, А. В. Зотеев, А. А. Склянкин. – М.: МГУ, физический факультет, 2012. – 39 с.
29. Зегидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
30. Зеленин, А. Н. Машины для земляных работ / А. Н. Зеленин, В. И. Баловиев, И. П. Керров. – М.: Машиностроение, 1975. – 440 с.
31. Зеленин, А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. – М.: Машиностроение, 1968. – 450 с.
32. Иванов, К. И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых / К. И. Иванов, В. А. Латышев, В. Д. Андреев. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
33. Иванова, А. М. Кайнозойский рудогенез в шельфовых областях России / А. М. Иванова, А. Н. Смирнов, В. И. Ушаков. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2005. – 168 с.
34. Иванова, А. М. Шельфовые железомарганцевые конкреции - новый вид минерального сырья / А. М. Иванова, А. Н. Смирнова, В. С. Рогов // Минеральные ресурсы России. № 6, 2006.
35. Каманин, Ю. Н. Методика выбора рациональных параметров гидравлического ударного устройства // Ударно-вибрационные системы, машины и технологии. Материалы V международного симпозиума. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2013. с. 199–202.

36. Каширский, А. С. Обоснование параметров кассетного трала для подводной добычи железомарганцевых конкреций: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Каширский Алексей Сергеевич. – Владикавказ, 2021. – 133 с.
37. Кириченко, Е. А. Моделирование динамических процессов в глубоководных пневмогидротранспортных системах / Е. А. Кириченко, О. Г. Гоман, В. Е. Кириченко, А. В. Романюков. – Днепропетровск.: изд. НГУ, 2012. – 266 с.
38. Коробков, В. А. Подводная технология / В. А. Коробков, В. С. Левин, А. В. Лукашков, П. П. Серебrenицкий. – Л.: Судостроение, 1981. – 240 с.
39. Королев, Р. И. Использование и модернизация погружного пневмоударника бурового става СБШ-250 / Р. И. Королев, П. Д. Соболева // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019. Сборник научных трудов. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. – 2019. – С. 276-283
40. Корсаков, О. Д. Условия образования и закономерности размещения железомарганцевых конкреций Мирового океана. – Л.: Недра, 1987. – 259 с.
41. Коршунов, В. А. Расчётный метод построения паспорта прочности горной породы по результатам испытаний образцов сферическими инденторами / В. А. Коршунов, Д. Н. Петров, К. Н. Ястребова // Сборник трудов конференции инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. 2017. – с. 256–265.
42. Коршунов, В. А. Новый способ определения предела прочности при растяжении горных пород/ В. А. Коршунов, Ю. М. Карташов // Записки горного института. – 2011. – т. 190. – с. 202–206.
43. Кичигин, А. Ф. Механическое разрушение горных пород комбинированным способом / А. Ф. Кичигин, С. Н. Игнатов, А. Г. Лазуткин, И. А. Янцен. – М.: Недра, 1972. – 256 с.
44. Лавренко, С. А. Обоснование параметров исполнительных органов комплекса для проведения вспомогательных выработок в условиях кембрийских глин: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Лавренко Сергей Александрович. – СПб, 2014. – 181 с.

45. Маховиков, Б. С. Анализ работы исполнительного органа машины для добычи конкреций на шельфе. Технология и механизация горных работ., сб. научных трудов. – М.: изд. АГИ, 1998.
46. 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.
47. Маховиков, Б. С. Горнодобывающий комплекс для морской разработки твердых ПИ / Б. С. Маховиков, М. Л. Кабанов // Горные машины и автоматика. 2003. – № 5, с. 30–32.
48. 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. – 211 с.
49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. Менард, Г. У. Геология дна Тихого океана. – М.: МИР, 1966. – 275 с.
53. МИ 2949-05 «ГСИ. Машины универсальные испытательные серий Z; SP фирмы ZWICK GmbH & Co. Методика поверки». – Екатеринбург: ФГУП «УНИИМ», 2005. – 9 с.
54. Некрасов, С. С. Сопротивление хрупких материалов резанию. – М.: Машиностроение, 1971. – 182 с.

55. Нурок, Г. А. Технология добычи полезных ископаемых со дна озер, морей и океанов / Г. А. Нурок, Ю. В. Бруякин, Ю. В. Бубис. – М.: Недра, 1979. – 381 с.
56. Патент № 143015 Российская Федерация, МПК E21C 50/02 (2006.01). Устройство сбора конкреций придонного самоходного агрегата : № 2013158895 : заявлено 30.12.2013 : опубликовано 10.0.2014, Бюл. № 19 / Быстров Е. О., Вершинский Ф. В., Гнездилов С. Г., Шубин А. Н., Ширяев Б. К.
57. Патент № 2371580 Российская Федерация, МПК E21C 50/02 (2006.01). Подводный добывающий аппарат и способ его работы : № 2008104652 : заявлено 12.02.2008 : опубликовано 27.10.2009, Бюл. № 30 / Беляев В. И.
58. Патент № 2301338 Российская Федерация, МПК E21C 50/02 (2006.01). Комплекс для разработки полезных ископаемых шельфовой зоны Мирового океана : № 2006100405 : заявлено 10.01.2006 : опубликовано 20.06.2007, Бюл. № 17 / Юнгмейстер Д. А., Маховиков Б. С., Смирнов Д. В., Бурак А. Я.
59. 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.
60. 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.
61. 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.
62. 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.

63. 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.

64. 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.

65. 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.

66. 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.

67. 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.

68. 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.

69. 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.

70. 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.

71. 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.

72. 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.

73. 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.

74. 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.

75. Патент № 2214510 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2000.01).
Глубоководный добычный 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.

76. 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.

77. 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.
78. Патент № 2181836 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2000.01). Агрегат для подводной разработки : № 2000112690 : заявлено 22.05.2000 : опубликовано 27.04.2002, Бюл. № 12 / Войлошников М. В., Черней Э. И.
79. Патент РФ № 2015334 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (1990.01). Агрегат для разработки кобальтовых корок : № 5029893 : заявлено 12.07.1991 : опубликовано 30.06.1994 / Черней Э. И., Хершберг Б. Л., Черней О.Э.
80. Патент № 2182230 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2000.01). Устройство для подводной разработки : № 2000112689 : заявлено 22.05.2000 : опубликовано 22.05.2000, Бюл. № 13 / Войлошников М. В., Черней Э. И.
81. Патент № 2168633 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 (2000.01). Комплекс для подводной добычи полезного ископаемого : № 99104439 : заявлено 09.03.1999 : опубликовано 10.06.2001, Бюл. № 16 / Изаксон В. Ю., Бандопадхай Сукумар, Власов В. Н.
82. Письменный, Д. Т. Конспект лекций по теории вероятностей, математической статистике и случайным процессам / Д. Т. Письменный. – М.: Айрис-пресс, 2007. – 288 с.
83. Плотников, В. П. Определение основных параметров корончатых исполнительных органов комбайнов с гидроприводом для добычи крупного угля / В. П. Плотников // Горный информационно-аналитический бюллетень № 2. 2006. – с. 71–75.
84. Подэрни, Р. Ю. Механическое оборудование карьеров / Р. Ю. Подэрни – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та (МГГУ). 2007. – 680 с.
85. Покровский, И. С. Теория ударного бурения / И. С. Покровский // Горный журнал. – 1949. – № 12. – с. 17-26.
86. Протасов, Ю. И. Теоретические основы механического разрушения горных пород / Ю. И. Протасов. – М.: Недра, 1985. – 242 с.
87. Протодяконов, М. М. Методика рационального планирования экспериментов / М. М. Протодяконов, Р. И. Тедер. – М.: Наука, 1970. – 76 с.
88. Родин, Р. А. О механизме роста трещины при разрушении упруго-хрупкого

- тела / Р. А. Родин // Горный журнал. Изв. ВУЗов. – 1991. - № 10. – с. 5–12.
89. Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
90. Рукодельцев, А. С. Определение эффективности применения вибрационного грейфера с аккумулятором энергии для перегрузки сыпучих материалов при отрицательных температурах: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Рукодельцев Александр Сергеевич. – Нижний Новгород, 2002. – 172 с.
91. РТМ 212.0133-85. Грейферы двухчелюстные канатные общего назначения для портовых кранов. Методы расчета при проектировании. – Введ. 01.06.85 – Горький, 1955. – 55 с.
92. Савенко, В. С. Физико-химический анализ процессов формирования железомарганцевых конкреций в океане / В. С. Савенко. М.: ГЕОС, 2004. – 156 с.
93. Севастьянов, В. А. Разработка методики расчета и создание рациональной конструкции канатного грейфера-рыхлителя для смерзшихся сыпучих материалов: дис. ... канд. техн. наук / Севастьянов Владимир Апполинарьевич. – Нижний Новгород, 2006. – 187 с.
94. 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.
95. Сержан С. Л. Оснащение грунтозаборного устройства рабочим органом с объемным гидродвигателем / С. Л. Сержан // Горное оборудование и электромеханика № 10. 2013. – с. 39–42.
96. Ставрогин, А. Н. Механика деформирования и разрушения горных пород / А. Н. Ставрогин, А. Г. Протосеня. М.: Недра, 1992. – 224 с.
97. Суриков, В. В. Механика разрушения мерзлых грунтов / В. В. Суриков. – Л.: Стройиздат, 1979. – 127 с.
98. 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.

99. 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. 2019. – № 463.

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

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

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

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

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

105. Шалыгин, А. В. Обоснование параметров подводной машины для добычи твердых полезных ископаемых с поверхности морского дна: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06 / Шалыгин Алексей Викторович; – Санкт-Петербург, 2007. – 128 с.

106. 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.

107. Юнгмейстер, Д. А. Исследование параметров устройства для добычи кобальто-марганцевых корок / Д. А. Юнгмейстер, **Р. И. Королев**, С. Л. Ивановский, Э. О. Бородкин // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020. Сборник научных трудов. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. – 2020. – С. 410–414.

108. 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.

109. 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.
110. 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.
111. 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.
112. Atmanand, M. A. Concepts of deep-sea mining technologies / M. A. Atmanand, G. A. Ramadass // Springer International Publishing. – 2017. – P. 205-341.
113. Baker, E. Deep Sea Minerals: Cobalt-rich Ferromanganese Crusts, a physical, biological, environmental, and technical review / E. Baker, Y. Beaudoin // Secretariat of the Pacific Community. 2013. – V. 1C. – P. 52.
114. Cherkashov, G. Seafloor massive sulfides from the Northern Equatorial Mid-Atlantic Ridge: new discoveries and perspectives / G. Cherkashov, I. Poroshina, T. Stepanova, V. Ivanov, V. Bel'tenev // Marine Georesources & Geotechnology, 2010. – V. 28. – P. 222–239.
115. Ishiguro, S. Development of Mining Element Engineering Test Machine for Operating in Seafloor Hydrothermal Deposits / S Ishiguro, Y. Yamauchi, H. Odaka, S. Akiyama // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2013. – V. 50. – № 2. – P. 21–26.
116. Ishiguro, S. 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. – P. 1-7.

117. Khoreshok, A. 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). – P. 70–80.
118. 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. – P. 76–101.
119. 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.
120. 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. – Vol. 194(3). – 032006.
121. 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 Masses* this link is disabled, 2018. – № 1. – P. 299–306.
122. Lipton, I. Preliminary Economic Assessment of the Solwara Project, Bismark Sea, PNG – Nautilus Minerals Niugini Ltd / I. Lipton, E. Gleeson, P. Munro // *Technical report compiled under*. – 2018. – P. 242.
123. 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. – P. 119901.
124. Morgan, Ch. Mining Development Scenario Summary (Cobalt-rich Ferromanganese Crusts deposits) // *Proceedings of the International Seabed Authority's Workshop held in Kingston, Jamaica*. – 2006. – P. 131-207.
125. Otsuka, K. An application of ocean mining technology: deep ocean water utilization / K. Otsuka, K. Ouchi // *Springer International Publishing*. – 2017. – P. 345–361.
126. Pavlovich, A. A. Estimation of rock mass strength in open-pit mining / A. A. Pavlovich, V. A. Korshunov, A. A. Bazhukov, N. Y. Melnikov // *Journal of*

Mining Institutethis link is disabled. – 2019. – 239. – P. 502–509

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

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

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

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

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

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

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

134. 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. – P. 91–101.

135. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Акт внедрения результатов диссертационной работы



ООО «Гидравлический комплекс» (ООО ГИКО)
198035, Санкт-Петербург
Межевой канал, д.3 корпус 2, Лит.А

www.hycos.ru

Акт
о внедрении результатов диссертационной работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы: «Обоснование и выбор конструктивных и схемных решений оборудования для подводной добычи кобальтоносных железомарганцевых корок (КМК)» Королева Романа Ивановича на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.06 – Горные машины, выполненной в Санкт-Петербургском горном университете, за период с 2018 г. по 2021 г. - приняты к внедрению.

Форма внедрения результатов диссертационной работы:

1. определена область рационального применения разработанного глубоководного сборщика с грейферным исполнительным органом со встроенным ударником;
2. разработана методика расчета основных параметров грейферного исполнительного органа со встроенным ударником;
3. представлены компоновочные схемы и чертежи глубоководного сборщика с модернизированным грейферным исполнительным органом, согласно патенту № RU 203596 U1.

Указанные выше материалы будут использоваться при проектировании глубоководных комплексов для добычи кобальтоносных железомарганцевых корок и/или железо-марганцевых конкреций, залегающих на дне Мирового океана. Использование разработанной конструкции устройства после успешных испытаний позволит реализовать промышленную добычу подводных месторождений твердых полезных ископаемых.

Генеральный директор
ООО «Гидравлический комплекс»

15.02.2022



Григорчук А

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Пример расчета производительности сборщика КМК с грейферными ИО и встроенными в челюсти ударниками

1. Определение параметров грейферного ковша

Исходные данные для расчета: однородные КМК со средней мощностью 0,1 м и $\sigma_{сж} = 5,87$ МПа.

Рассчитывается ширина захвата грейфера исходя из мощность слоя рудной части КМК $h_k = 0,1$ м по формуле (Б1):

$$B = \frac{h_k}{0,26} = \frac{0,1}{0,26} \approx 0,4 \text{ м.} \quad (\text{Б1})$$

Так как КМК однородные, то форма скола будет иметь форму цилиндра, объем которого при мощности корки 0,4 определяется по формуле (Б2) и составит:

$$V_{гр} \approx V_{ск} = \frac{\pi B^2}{4} h_k \approx 0,05 \text{ м}^3. \quad (\text{Б2})$$

где $V_{гр}$ – объем грейфера, м^3 .

По графику на рисунке Б1 определится объем промежуточного бункера сборщика.

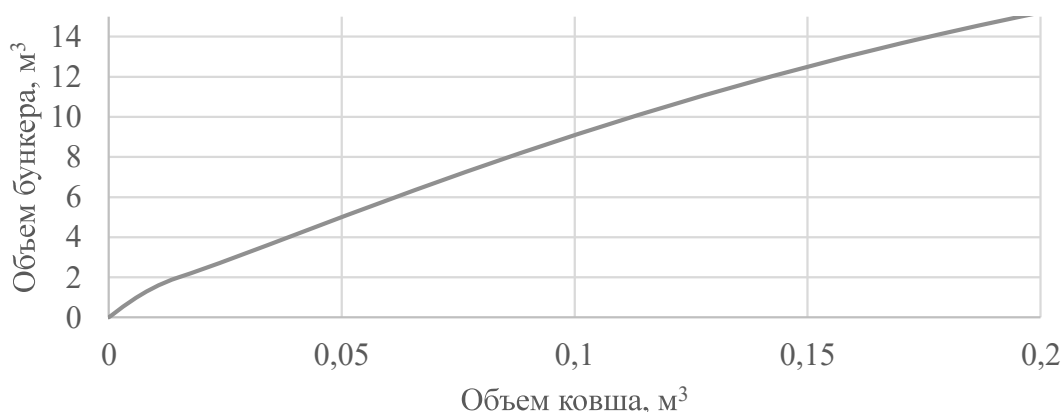


Рисунок Б1 – График зависимости объема бункера от объема ковша

Требуемый объем бункера - 5 м^3 , тогда количество черпаний рассчитаем по формуле (Б3):

$$n = \frac{V_б}{V_{гр}} = \frac{5}{0,05} \approx 100 \text{ шт,} \quad (\text{Б3})$$

где $V_б$ – объем бункера, м^3 ;

$V_{гр}$ – объем грейферного ковша, м³.

2. Определение усилий на режущих элементах грейферного ковша

Исходные данные для расчета:

- длина режущей кромки клинового РЭ - $l = 0,02$ м;
- угол заострения клинового РЭ - $\beta = 30^\circ$;
- удельное сопротивление КМК внедрению - $\sigma_{вн} = 1,15$ МПа;
- стальной грейфер с массой $m_{гр} \approx 150$ кг;
- высота коша $H = 0,4$ м.

Коэффициент действия силы Архимеда для стальных изделий определяется по известной формуле (Б4):

$$k_A = 1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho_{ст}} = 1 - \frac{1030}{7800} = 0,87, \quad (\text{Б4})$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³;

$\rho_{ст}$ – плотность стали, кг/м³.

Глубина начального внедрения определяется по эмперической функциональной зависимости (Б5):

$$h_{0вн} = \sqrt[0,54]{\frac{m_{гр} g k_A}{4,73 \sigma_{вн} l t g \beta}} = 14,5 \text{ мм.} \quad (\text{Б5})$$

Определяется удельная сила сопротивления смыканию челюстей по выражению (Б6):

$$F_{ч} = \frac{(m_{гр} g k_A + \sigma_{сж} h_{0вн} l \mu) H}{h_{0вн} l} = 1035 \text{ Н/м.} \quad (\text{Б6})$$

3. Расчет параметров ударника

Исходные данные для расчета: требуемая энергия удара $A_{уд} = 7,5$ Дж.

По графику зависимости длины поршня-ударника от его скорости для интервала ударной скорости в пределе 5-10 м/с (рисунок Б3) определяется ориентировочно длина и площадь сечения поршня-ударника исходя из размера челюсти грейферного ковша, в которую встраивается ударник.

Для встроенного в челюсть ударника, ковша объемом до 0,015 м³, следует рассматривать ударники меньшей длины и большей площади сечения, поэтому

приняв скорость соударения $\vartheta_{уд} = 7 \text{ м/с}$ и $S_{п} = 7 \text{ см}^2$, рассчитаем точное значение длины поршня-ударника по формуле (Б7):

$$l = \frac{2a^2 A_{уд}}{E \vartheta_{уд}^2 S_{п}} = \frac{2 \cdot 5300^2 \cdot 7,5}{21 \cdot 10^{10} \cdot 7,0^2 \cdot 7 \cdot 10^{-4}} = 0,058 \text{ м} \quad (\text{Б7})$$

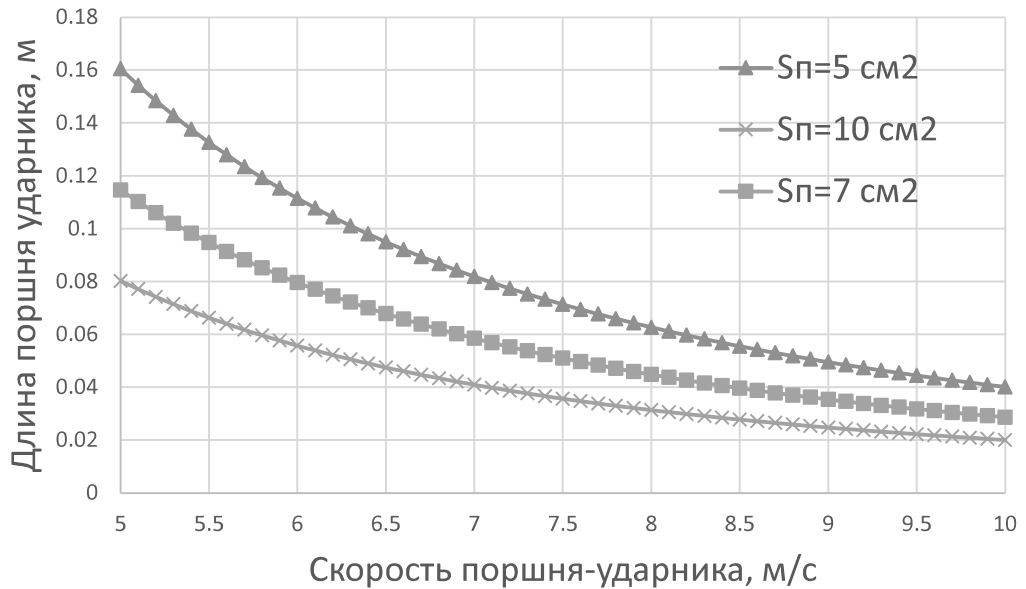


Рисунок Б3 – График зависимости длины поршня от его скорости при требуемой энергии удара 7,5 Дж

Масса поршня-ударника определяется из выражения (Б8) и составит:

$$m_1 = \frac{2A_{уд}}{\vartheta_{уд}^2} = 0,3 \text{ кг}. \quad (\text{Б8})$$

Тогда рассчитаем требуемое давление в системе по формуле (Б9):

$$p_0 = \frac{m_1 \vartheta_{уд}^2}{0,656 S_{гг} S_{п}} = \frac{0,3 \cdot 7,0^2}{0,656 \cdot 0,02 \cdot 9,81 \cdot 7 \cdot 10^{-4}} = 163209 \text{ кг/м}^2 = 16,0 \text{ бар}. \quad (\text{Б9})$$

где p_0 – давление рабочей жидкости, кг/м²;

$S_{гг}$ – ход поршня, $S_{гг} = 0,02 \text{ м}$.

Глубина внедрения от единичного удара находится по формуле (Б10):

$$h_{0уд} = \sqrt{\frac{A_{уд}}{d_{п} \sigma_{сж} (\text{tg}(\alpha/2) + \mu) K_{зам}}} = 0,0085 \text{ м} = 8,5 \text{ мм}. \quad (\text{Б10})$$

где $d_{п}$ – диаметр инструмента, принятый диаметру поршня-ударника, $d_{п} = 30 \text{ мм}$.

Суммарная величина первоначального заглубления при комбинированной

схеме сбора рассчитывается по выражению (Б11) и составит:

$$h_0 = h_{\text{вн}} + h_{\text{оуд}} = 14,5 + 8,5 = 24,5 \text{ мм.} \quad (\text{Б11})$$

Удельная сила сопротивления смыканию челюстей с учетом увеличенной глубины начального внедрения от ударной рассчитывается по выражению (Б12):

$$F_{\text{ч.уд}} = \frac{(m_{\text{гр}}g + \sigma_{\text{сж}}h_0l\mu)H}{h_0l} = 746 \text{ Н/м} \quad (\text{Б12})$$

4. Расчет производительности сборщика

Рассчитывается теоретическая производительность грейферного исполнительного органа:

$$Q_{\text{теор}} = \frac{3600V_{\text{гр}}K_3}{T_{\text{ц}}K_y}, \text{ м}^3/\text{час}, \quad (\text{Б13})$$

где $T_{\text{ц}}$, с – время цикла сбора одного ковша, с;

K_y - приведенный коэффициент корректировки, учитывающий замедление движений в воде, $K_y=1,5$;

K_3 – коэффициент заполнения грейфера, $K_3 = 0,8$.

Время цикла сбора может быть рассчитано по следующей формуле (Б14):

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6, \quad (\text{Б14})$$

где t_1 – время внедрения ковша, с;

t_2 - время смыкания челюстей, с;

t_3 – время подъема ковша, 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, с.

Найдем время внедрения ковша по формуле (Б15):

$$t_1 = \frac{h_0}{v_{\text{п}}} = \frac{0,016}{0,8} = 0,2 \text{ с}, \quad (\text{Б15})$$

где $v_{\text{п}}$ – скорость подачи ковша, $v_{\text{п}} = 0,8$ м/с.

Время смыкания челюстей находится по формуле (Б16):

$$t_2 = \frac{L}{v_{\text{ч}}}, \quad (\text{Б16})$$

где $v_{\text{ч}}$ – скорость смыкания челюстей, м/с; L – путь, пройденный челюстью при смыкании, четверть эллипса или сумма сторон прямоугольника, м.

При форме скола в виде цилиндра, путь прохождения челюстью при смыкании рассчитаем по формуле (Б17):

$$L = \frac{B}{2} + h_{\text{к}} = 0,2 + 0,1 = 0,3 \text{ м}. \quad (\text{Б17})$$

Скорость смыкания челюстей $v_{\text{ч}}$ при частоте ударов $n_{\text{уд}} = 20$ уд/с рассчитывается по формуле (Б18) и составит:

$$v_{\text{ч}} = v_{\text{см}} + \frac{A_{\text{уд}} n_{\text{уд}}}{hl\sigma_{\text{сж}}(\text{tg}(\beta/2) + \mu)K_{\text{зат}}} = 0,1 \text{ м/с}, \quad (\text{Б18})$$

где $v_{\text{см}}$ – скорость движения челюсти, $v_{\text{см}} = v_{\text{п}}$, м/с.

Тогда время смыкания челюстей составит:

$$t_2 = \frac{0,3}{0,1} = 3 \text{ с}.$$

Время на подъем и опускания грейфера будет одинаковое и рассчитывается по формуле (Б19):

$$t_3 = t_6 = \frac{H_1}{v_{\text{п}}} = \frac{1}{0,8} \approx 1,5 \text{ с}, \quad (\text{Б19})$$

где H_1 – высота от почвы до высоты разгрузки ковша, равная высоте бункера, $H_1 = 1$ м.

$$T_{\text{ц}} = 0,2 + 3 + 1,5 + 2 + 5 + 1,5 \approx 15 \text{ с},$$

Откуда теоретическая производительность составит:

$$Q_{\text{теор}} = \frac{3600 \cdot 0,05 \cdot 0,8}{15 \cdot 1,5} \approx 6,5 \text{ м}^3/\text{час}.$$

Расчетная часовая производительность одного сборщика с грейферными исполнительными органами и встроенными ударниками в челюстях определяется из выражения (Б20) и составит:

$$Q_{\text{расч}} = \frac{3600\rho V_6}{(T_{\text{ц}}n + T_{\text{дв}} + T_{\text{разгр}} + T_{\text{пер}})} = \frac{3600 \cdot 1,5 \cdot 5}{(15 \cdot 100 + 150 + 150 + 150)} \approx \quad (\text{Б20})$$

$$\approx 13 \text{ т/м,}$$

где ρ_k – плотность КМК; V_6 – объем промежуточного бункера; n – количество загружаемых ковшей требуемое для наполнения бункера; $T_{\text{дв}}$ - время передвижения к узлу перегрузки; $T_{\text{разгр}}$ - время выгрузки бункера на перегружатель; $T_{\text{пер}}$ - время передвижения прежнее или новое место сбора.

Для достижения производительности 1 млн. т/год необходимо добывать 110...125 т/час, что возможно обеспечить 10 сборщиками, работающих на один бункер (бадью).