

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

На правах рукописи

Малеванный Дмитрий Владимирович



ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР КРИТЕРИЕВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ТРЕБОВАНИЙ К ТРАНСПОРТИРОВКЕ И ПОДЪЕМУ ЖМК С МОРСКОГО
ДНА

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Сержан С.Л.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМАТИКЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	11
1.1 Горно-геологические условия глубоководных месторождений твердых полезных ископаемых.....	11
1.2 Анализ существующих технологий для добычи глубоководных ТПИ.....	17
1.3 Оценка энергоэффективности технологий подъема.....	28
1.4 Выводы по главе 1	33
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОПОДЪЕМА КОНКРЕЦИИ ПРИ ПОМОЩИ КАПСУЛЫ.....	35
2.1 Циклично-поточная технология подъема конкреций с Морского дна.....	35
2.2 Основные параметры промежуточной капсулы	41
2.3 Обоснование рациональной формы промежуточной капсулы	46
2.4 Определение рациональных геометрических размеров.....	49
2.5 Расчет удельной производительности циклично-поточного способа подъема	53
2.6 Выводы по главе 2.....	58
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРУЖЕНИЯ КАПСУЛЫ	60
3.1 Сопротивление тел, обтекаемых вязкой жидкостью.....	60
3.2 Существующие эксперименты определения сопротивления пограничного слоя	63
3.3 Стенд для исследования воздействия гидродинамического сопротивления....	71
3.4 Оценка погрешности эксперимента	78
3.5 Компьютерное моделирование процесса погружения промежуточной капсулы.....	80
3.6 Масштабирование экспериментальных значений на действительные размеры.....	92

3.7 Определение рациональных параметров промежуточной капсулы циклично-поточной технологии подъема.....	94
3.8 Выводы по главе 3.....	95
ГЛАВА 4 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЦИКЛИЧНО-ПОТОЧНОГО СПОСОБА.....	97
4.1 Прочностной расчет при помощи компьютерного моделирования	97
4.2 Методика определения количества требуемых судов.....	100
4.3 Экономическая оценка комплекса.....	103
4.4 Производственные риски реализации комплекса.....	106
4.5 Выводы по главе 4.....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	112
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов исследования	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение	129
ПРИЛОЖЕНИЕ В Патент на полезную модель	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Результаты эксперимента	132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В условиях постепенного истощения наземных запасов твердых полезных ископаемых (ТПИ) и возрастающего спроса на редкие и стратегически значимые металлы, расширение минерально-сырьевой базы приобретает первостепенное значение. Значительные запасы таких элементов, как никель, кобальт, марганец и медь, сосредоточены на глубоководных месторождениях, среди которых выделяются железомарганцевые конкреции (ЖМК). Эти месторождения распространены на значительных площадях морского дна Мирового океана на глубинах от 3500 метров и характеризуются относительно высоким содержанием полезных компонентов, простым минеральным составом, что облегчает их переработку и позволяет снизить количество образующихся отходов.

Промышленное освоение глубоководных месторождений сталкивается с рядом серьезных проблем, основная из которых связана с высоким энергопотреблением и удаленностью месторождений от стабильных источников энергии. К примеру, проект Hidden Gem компании Allseas ориентировочно потребляет от 350 до 550 кВт·ч на тонну собранных конкреций. Ключевым проблемным узлом подводного добычного комплекса является механизм транспортировки ЖМК с больших глубин на поверхность, составляющей 45% от общих энергозатрат. Проблема обусловлена высокими значениями гидростатического давления, низкими температурами и сложными гидродинамическими условиями на значительных глубинах, а также необходимостью минимизировать энергоемкость и обеспечить непрерывное, равномерное и управляемое перемещение ЖМК от морского дна до поверхности при минимальных колебаниях расхода, давления и скорости потока.

Одним из возможных решений для преодоления указанных проблем является снижение энергоемкости транспортно-технологического процесса путем исключения из промежуточной капсулы с атмосферным воздухом силового оборудования (грунтового насоса) и использования лебедки, расположенной на судне. При этом в качестве источника энергии выступает гидростатическое

давление, обусловленное глубиной расположения промежуточной капсулы, параметры которой обосновываются в процессе исследований.

Совершенствование технологий подъема железомарганцевых конкреций, как приоритетного объекта освоения вследствие их широкого распространения и значительных запасов, в том числе в российском разведочном районе провинции Кларион–Клиппертон, позволит обеспечить доступ к стратегически важным металлам, снизить нагрузку на наземные экосистемы и содействовать выполнению международных обязательств России по Конвенции ООН по морскому праву. Таким образом, проведение исследований, направленных на обоснование критериев и технологических требований, способствующих повышению энергоэффективности процесса подъема железомарганцевых конкреций с глубоководных месторождений, является крайне важным и своевременным направлением работы, обеспечивающим рациональное использование минерально-сырьевых ресурсов Мирового океана.

Степень проработанности темы исследования

Значительный вклад в разработку технологий глубоководной разработки твердых полезных ископаемых России внесли ученые: Нурок Г.А., Добрецов В.Б., Маховиков Б.С., Тарасов Ю.Д., Юнгмейстер Д.А., Кириченко Ю.В., Рева Ю.В., Александров В.И., Собота Е. и др. Общий вклад в исследование машин и геотехнологии внесли зарубежные ученые Zenghui Liu, Lu C. Y., Leng D., Wang S., Toro N., Knodt S. и др. Горно-геологическое исследование минеральных ресурсов Мирового океана проводили ученые: Черкашев Г.А., Юбко В.М., Пономарева И.Н. и др.

Задачи о создании глубоководного комплекса по добыче уникальных твердых полезных ископаемых решались в рамках исследований отечественных и зарубежных научных организаций ФГБУ «ВНИИОкеангеология», ООО «ГИКО», Allseas TMC (Швейцария), COMRA (Китай) и др. Результаты исследований были опубликованы следующими авторами: Лаптева А.М., Голева Р.В., Collins P. C., Croot P., Carlsson J., Colaço A., Grehan A., Hyeong K.

Исследования процесса погружения тела в воду и пограничного слоя

жидкости проводились следующими учеными: Шлихтинг Г., Лойцянский Л. Г., Парвиз М., Ким Д. и др.

Однако, несмотря на продолжающееся развитие исследований в области освоения глубоководных месторождений, решение вопроса о снижении энергоёмкости их разработки до сих пор остаётся актуальной научной задачей.

Объект исследования: транспортно-технологический процесс подъема глубоководных твердых полезных ископаемых

Предмет исследования: промежуточная капсула

Цель работы – разработка способа снижения энергоёмкости процесса подъема железомарганцевых конкреций с морского дна.

Идея работы: снижение энергоёмкости транспортно-технологического процесса путём исключения из промежуточного сосуда силового оборудования (грунтового насоса), осуществление транспортирования капсулы при помощи лебедки, расположенной непосредственно на судне, за счёт использования в качестве источника энергии гидростатического давления, определяемого глубиной расположения промежуточной капсулы.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ существующих средств и способов подъема глубоководных твердых полезных ископаемых (конкреций) с морского дна, а также горно-геологических условий залегания месторождений.

2. Разработать технологию подъема глубоководных твердых полезных ископаемых (конкреций) с использованием промежуточной капсулы с атмосферным воздухом. Определить рациональные параметры промежуточного сосуда.

3. Определить степень влияния коэффициента гидродинамического сопротивления среды на производительность и энергоёмкость процесса подъема разработанной технологии с использованием промежуточной капсулы с атмосферным воздухом.

4. Оценить влияние массы, плотности и скорости погружения промежуточного сосуда на величину коэффициента гидродинамического

сопротивления эмпирическим методом и установить характер изменения параметров экспериментальной модели капсулы при различных геометрических формах при помощи компьютерного моделирования.

5. Установить рациональные параметры промежуточной капсулы для разработки месторождений ЖМК с глубин более 3500 метров.

Методы исследования: обобщение и анализ теории и практики в области глубоководной разработки твердых полезных ископаемых, математическое моделирование технологии подъема с использованием промежуточной капсулы, теоретическое и экспериментальное исследование коэффициента гидродинамического сопротивления, компьютерное моделирование перехода экспериментальной модели к реальным условиям.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Сформулирован и теоретически обоснован принцип организации транспортно-технологического процесса подъема железомарганцевых конкреций, заключающийся в использовании в качестве источника энергии гидростатическое давление воды

2. Получена аналитическая зависимость производительности циклично-поточной технологии подъема железомарганцевых конкреций от геометрических и гидродинамических характеристик промежуточной капсулы, имеющая характер экспоненциального насыщения, позволяющая прогнозировать технологические показатели при изменении конструкции транспортного устройства.

3. Экспериментально и численно установлена зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления цилиндрической промежуточной капсулы от коэффициента её формы, описываемая квадратичной полиномиальной функцией.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Циклично-поточная технология подъема твердых полезных ископаемых с глубоководных месторождений, основанная на использовании гидравлической энергии водной среды и исключения насосного оборудования при подъеме твердых полезных ископаемых с глубоководных месторождений, позволяет снизить энергоемкость процесса подъема не менее, чем на 18%;

2. Использование цилиндрического промежуточного сосуда с торцевыми полусферами с коэффициентом формы около 0,6 позволяет достичь наименьшего значения коэффициента сопротивления 0,35, что обеспечивает снижение энергоемкости процесса транспортирования не менее чем на 9%.

Достоверность защищаемых положений.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций основывается на корректном использовании общепризнанных теорий, методов и подходов, имитационном и численном моделировании, сходимости результатов моделирования и экспериментальных исследований.

Теоретическая и практическая значимость

Разработана конструкция промежуточной капсулы с атмосферным воздухом для подъема глубоководных твердых полезных ископаемых на поверхность, техническим результатом которой является повышение надежности системы и повышение энергетической эффективности, а также описан принцип работы циклично-поточной технологии разработки месторождений с применением разработанной капсулы (патент на изобретение №2779867 от 13.04.2022);

Уточнены закономерности влияния геометрических параметров и формы сосуда на коэффициенты гидродинамического сопротивления, что способствует развитию теории гидродинамики применительно к специфическим условиям глубоководного транспорта;

Результаты исследований будут использованы в деятельности компании АО «ГИКО» при разработке опытного образца комплекса для глубоководной добычи ЖМК – акт внедрения от 10.04.2025 (Приложение А).

Соответствие паспорту специальности:

Полученные научные результаты соответствуют **паспорту научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины** по п. 14 «Критерии и технологические требования при создании новых и совершенствования применяемых горных машин с учетом особенностей условий их эксплуатации при разработке месторождений твердых полезных ископаемых».

Апробация работы.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на конференциях: XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); XI форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, 2022 г.); XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2023» (г. Москва, 2023 г.); Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.).

Личный вклад автора заключается в формулировке цели и задач диссертационной работы; анализе объекта и предмета исследования; разработке методологических подходов для проведения экспериментальных исследований; разработке математической модели процесса транспортирования циклично-поточной технологии; обработке результатов исследования; подготовке публикаций.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 4 печатных работах (пункты списка литературы № 23, 24, 25, 26), 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 и в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получены 1 патент на изобретение (Приложение Б), 1 патент на полезную модель (Приложение В) и 1 свидетельство на программу для ЭВМ (Приложение Г).

Структура и объем работы: Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения и библиографического списка, содержит 135 страниц машинописного текста, 51 рисунок, 22 таблицы, список литературы из 111 наименований и 5 приложений на 8 страницах.

ГЛАВА 1 ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМАТИКЕ ДИССЕРТАЦИИ

1.1 Горно-геологические условия глубоководных месторождений твердых полезных ископаемых

Глубоководные месторождения твердых полезных ископаемых (ТПИ) представляют собой уникальные геологические объекты, которые формируются в экстремальных условиях гидросферы мирового океана (рисунок 1.1).

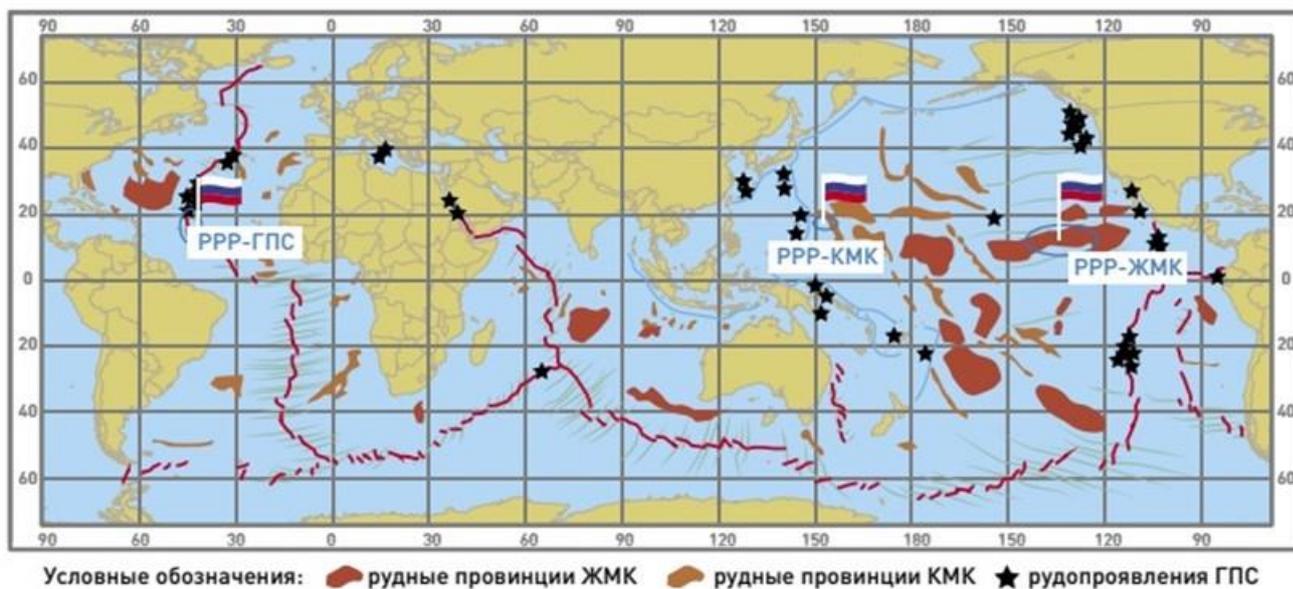


Рисунок 1.1 – Карта залегания основных месторождений уникальных ТПИ. PPP- Российский Разведочный Район – регион, выделенный России для добычи ТПИ

Важнейшими типами глубоководных ТПИ являются железомарганцевые конкреции (ЖМК), кобальтоносные марганцевые корки (КМК) и гидротермальные полиметаллические сульфиды (ГПС). Уникальность их заключается не только в особенностях формирования, но и в высоком содержании стратегически важных металлов, таких как никель, кобальт, медь и редкоземельные элементы [7, 8, 39].

Данная глава посвящена анализу их геологического положения, минерального состава, условий формирования, а также промышленного потенциала с акцентом на научные аспекты и сопоставление с континентальными месторождениями.

Железомарганцевые конкреции (ЖМК)

ЖМК встречаются на обширных участках глубоководных равнин и

поднятий, преимущественно в Тихом, Атлантическом и Индийском океанах. Наиболее известные месторождения сосредоточены в зоне Кларион—Клиппертон, на Центрально-Тихоокеанском поднятии и в южной части Индийского океана. Глубина их залегания варьируется от 3500 до 6000 метров, что определяет специфичность физико-химических условий осаждения [5, 102].

Области распространения ЖМК характеризуются стабильными гидродинамическими условиями, которые обеспечивают равномерное накопление гидроокислов металлов [37, 40]. Эти районы также связаны с низкой скоростью седиментации, что предотвращает засыпание конкреций осадками и способствует их сохранению в течение миллионов лет. Морфология конкреций может варьироваться от плоских до шарообразных форм, что зависит от условий осаждения и состава породы, на которой они формируются (рисунок 1.2) [94].



Рисунок 1.2 – Типовые рудопроявления ЖМК

ЖМК состоят из слоистых структур, формирующихся вокруг ядра — органических остатков, обломков базальтов или зубов акул. Основные минералы включают гидроокислы марганца и железа, богатые кобальтом, никелем, медью, а также редкими землями, такими как церий, иттрий и неодим [29, 30]. Концентрации металлов в ЖМК часто превосходят наземные аналоги, что делает их перспективными для добычи [20, 80].

Особенностью ЖМК является высокое содержание редкоземельных элементов (РЗЭ), которые востребованы в современной промышленности, включая производство электроники, оптических приборов и магнитных материалов. Например, церий, присутствующий в значительных концентрациях, играет

ключевую роль в создании высокоэффективных катализаторов и стеклокерамических материалов [14, 99]. Содержание полезных компонентов представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Содержание полезных ископаемых в уникальных глубоководных месторождениях [24]

ТПИ	Ni, %	Cu, %	Co, %	Mn, %	Pt, %	Mo, %	Pb, %	Au, г/т	Ag, г/т	Zn, %
ЖМК	0,46- 1,42	0,12- 1,18	0,20- 0,73	20,0- 36,05	0,2- 1,83	0,04- 0,06	-	-	-	-
КМК	0,5	-	0,60	20,0- 22,0	0,07- 0,14	0,05	-	0,12- 0,88	-	-
ГПС	-	2,61	-	-	-	-	0,18	0,68- 10,4	36,0- 164	7,82

Процесс образования ЖМК — это сложная комбинация диффузии металлов из осадочных и базальтовых пород, биогенных процессов и химического осаждения из морской воды. Средняя скорость роста конкреций составляет около 1-5 мм за миллион лет, что отражает экстремально медленные темпы геохимического осаждения [44, 60, 74].

Биогенные процессы включают активное участие микроорганизмов, которые ускоряют осаждение марганца и железа, создавая благоприятные условия для формирования слоистых структур. Исследования показывают, что содержание металлов в ЖМК напрямую связано с химическим составом морской воды и геохимической активностью пород, из которых происходит выщелачивание элементов [12, 18].

Плотность ЖМК составляет около 2,5 г/см³, с плотностью залегания в диапазоне от 5 до 25 кг/м². В зоне Кларион—Клиппертон разведанные ресурсы оцениваются более чем в 21 миллиард тонн, с концентрациями никеля и кобальта, в 2-3 раза превышающими аналогичные показатели для суши [56, 79, 93].

Плотность распределения ЖМК сильно варьируется между районами, что связано с различиями в геологическом строении морского дна. В центральной части Тихого океана встречаются наиболее богатые участки, где плотность залегания может превышать 30 кг/м², создавая высокие перспективы для

коммерческой разработки [89, 101].

ЖМК представляют значительный интерес для промышленности благодаря высокому содержанию редких металлов. Развитие технологий роботизированной добычи и дистанционного мониторинга может существенно снизить затраты. При этом наземные месторождения зачастую характеризуются более сложной переработкой, в то время как глубоководные ТПИ имеют меньший уровень примесей, что упрощает металлургические процессы [38, 75].

Сравнительный анализ с наземными месторождениями показывает, что добыча ЖМК обладает рядом преимуществ, включая низкий уровень отходов и высокую концентрацию стратегических металлов. Однако проблемы экологического характера, связанные с воздействием на морскую среду, остаются актуальными и требуют решения [10].

Кобальтоносные марганцевые корки (КМК)

КМК формируются на подводных возвышенностях, хребтах и вулканических массивах, включая возвышенность Яп и зону Кларион—Клиппертон. Глубины залегания составляют 800-2500 метров, что несколько меньше по сравнению с ЖМК, но требует аналогичного подхода к добыче [45, 55].

Основные районы распространения КМК связаны с зонами повышенной вулканической активности, что способствует их обогащению кобальтом и другими металлами. Уникальная геологическая структура подводных хребтов создает оптимальные условия для формирования корок, которые растут со скоростью от 1 до 6 мм за миллион лет (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Образец КМК

Корки отличаются высоким содержанием кобальта (до 1,5%), платины, титана и редких металлов. Осаждение происходит на базальтовом субстрате, что формирует плотные корки толщиной до нескольких сантиметров. Концентрация металлов в корках в 3-4 раза выше, чем в наземных рудах аналогичного состава.

КМК являются важным источником платины, которая используется в высокотехнологичных процессах, включая производство катализаторов, медицинских устройств и элементов водородной энергетики. Высокое содержание титана делает их перспективными для использования в аэрокосмической промышленности [61, 73, 105].

КМК формируются медленно, в течение миллионов лет, под воздействием океанических течений, которые обеспечивают стабильные условия для осаждения металлов из морской воды. Важным фактором является наличие активного биогенного взаимодействия [43, 66].

Процессы осаждения включают взаимодействие ионов металлов с органическими веществами и микроорганизмами, которые способствуют их аккумуляции на поверхности базальтового субстрата. Эти механизмы создают уникальные химические и структурные особенности корок [64, 83].

Объем разведанных запасов оценивается в 7-10 миллиардов тонн. Эти ресурсы представляют интерес для производства высокотехнологичных материалов, включая аккумуляторы и компоненты электронной промышленности [40].

Сложность разработки КМК связана с удаленностью месторождений и необходимостью разрушения базальтового субстрата. Тем не менее, исследования, направленные на создание экологически чистых технологий, могут сделать разработку корок экономически эффективной [51, 53, 109].

Усилия направлены на разработку подводных роботизированных систем, которые позволят минимизировать воздействие на окружающую среду и снизить затраты на добычу. Параллельно ведутся работы по созданию новых технологий переработки сырья с минимальными отходами [34, 71].

Гидротермальные полиметаллические сульфиды (ГПС)

ГПС формируются в активных зонах гидротермальной деятельности — срединно-океанических хребтах и зонах субдукции (рисунок 1.4). Наиболее значимые районы включают Восточно-Тихоокеанское поднятие и Срединно-Атлантический хребет. Минеральный состав включает халькопирит, сфалерит, пирит, обогащенные медью, цинком, свинцом, золотом и серебром [41, 70, 76].



Рисунок 1.4 – Образец ГПС (подводный «курильщик»)

Активные гидротермальные источники создают уникальные условия для осаждения сульфидов металлов. Химический состав растворов, температура и давление являются ключевыми факторами, влияющими на минералогию образующихся отложений [58, 69, 91].

Средняя плотность ГПС составляет 4,0-4,5 г/см³, а плотность залегания достигает 20-50 кг/м². Концентрация меди может достигать 15%, что делает эти месторождения уникальными с точки зрения промышленной значимости.

Хотя высокое содержание ценных металлов делает ГПС привлекательными для добычи, разрушение экосистем гидротермальных источников представляет серьёзный вызов. Разрабатываются методы экологически чистой добычи, минимизирующие ущерб биосфере [85, 92, 108].

Россия активно участвует в международных инициативах по освоению глубоководных месторождений. Лицензионные участки в зоне Клариян—Клиппертон и на Срединно-Атлантическом хребте характеризуются высоким потенциалом для добычи ЖМК и ГПС. Исследования направлены на оптимизацию технологий и оценку экологических последствий добычи.

В рамках международных соглашений Россия участвует в разработке стандартов для экологически безопасной добычи. Создаются совместные исследовательские программы, направленные на изучение геологии, экологии и технологий глубоководной добычи.

1.2 Анализ существующих технологий для добычи глубоководных ТПИ

Под подводной добычей твердых полезных ископаемых понимается разработка месторождений, залегающих на дне и в недрах Земли, покрытых Мировым океаном [7]. Разработка поверхностных месторождений ложе океана, к которым относятся глубоководные ТПИ (ЖМК, КМК и ГПС, в частности) планируется производить открытым способом через водную толщу. Особенность глубоководных поверхностных месторождений ТПИ заключается в том, что они залегают непосредственно на морском дне и не перекрыты пустыми породами, что в значительной степени сокращает проведение горных выработок, в том числе для вскрытия выемочных полей. Таким образом, для осуществления подводной добычи ТПИ не требуются вскрышные работы, а горноподготовительные работы незначительны, а наиболее объемными и трудоемкими являются добычные работы [24].

Под технологией разработки месторождений понимается совокупность взаимосвязанных процессов, способов и приемов механизированного производства горных работ. При осуществлении подводной добычи можно выделить следующие технологические процессы [37, 48, 50]: подготовку пород к выемке (разрушение массива); выемочно-погрузочные работы; перемещение (подъем) горной массы; складирование (отвалообразование) пустых пород; разгрузка и складирование ПИ; первичное обогащение. Также могут существовать варианты, при которых отсутствует процесс первичного обогащения [18, 24].

Под структурой комплексной механизации подводной добычи ТПИ понимается определенная взаимосвязь и расположение механизмов и устройств, выполняющих технологические процессы добычи. По классификации [2] комплексы оборудования разделяются на звенья соответственно процессам, выполняемым горными и транспортными машинами: звено подготовку пород к

выемке, звено выемки и погрузки; подъёмно-транспортное звено: непрерывного или цикличного; звено отвалообразования и складирования; звено первичного обогащения [24].

Добыча глубоководных твердых полезных ископаемых (ТПИ) является одной из ключевых задач современной инженерной геологии и морской добычи. Это направление требует сочетания высокотехнологичных решений, учитывающих экстремальные условия гидросферы, включая высокое гидростатическое давление, низкие температуры, отсутствие естественного освещения и удаленность месторождений. За последние десятилетия разработки в этой области получили значительный импульс благодаря международному сотрудничеству, в том числе с участием российских и зарубежных исследовательских групп [24].

Подводные добычные устройства для добычи ТПИ представляют собой сложные механические комплексы, способные эффективно функционировать в экстремальных условиях морского дна. Существующие технологии охватывают широкий спектр решений — от грейферных систем до высокотехнологичных роботизированных комплексов. Несмотря на многообразие конструкций, все они включают ряд общих систем [110]:

Система сбора материала: отвечает за непосредственный сбор ТПИ с морского дна. Включает грейферы, всасывающие устройства или ротирующие фрезы, способные взаимодействовать с различными типами морского грунта.

Система транспортировки: обеспечивает подъем собранного материала на поверхность. Это может быть тросовая система, гидротранспорт или более сложные двухстадийные механизмы с использованием промежуточных капсул.

Энергетическая система: включает элементы питания для работы механизмов на больших глубинах, в том числе гидравлические и электрические системы.

Система навигации и управления: оснащена сенсорами, позволяющими обеспечивать точность работы устройства на глубинах до 5000 метров. Включает системы дистанционного управления и мониторинга [11].

Испытания прототипов международных проектов проводятся с 1978 г., каждый раз демонстрируя различные нововведения и идеи. Страны-участники преследуют цель создания высокопроизводительного универсального добычного аппарата, способного вне зависимости от условий поверхности морского дна, свободно перемещаться и осуществлять сбор ТПИ [4, 9, 95]. На протяжении времени проводились многочисленные испытания, что в итоге привело к формированию определенного принципа создания добычной машины [2, 3, 28]. За счет свойств проходимости, маневренности, скорости передвижения мировыми проектами был признан наилучшим вариант гусеничного хода. Причем в настоящее время способы передвижения при помощи колес, а также шагающий способ, не рассматриваются как конкурентноспособные [19, 33, 82]. Отдельно можно выделить технологии, в которых в качестве добычного аппарата используются телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), например добычной робот компании NUSO Ltd. (рисунок 1.5).



Sagar Kanya, 2000



Sagar Kanya, 2010



Mine Ro-I, 2010



Mine Ro-II, 2012



Apollo-II, 2018



Patania II, 2018



Kunlong 500, 2018



Kunlong 2000, 2018



Рисунок 1.5 – Прототипы добычных аппаратов международных проектов [17, 24]

Такие машины в большинстве случаев не касаются поверхности морского дна, а осуществляют перемещение за счет нулевой плавучести и движущего привода [13, 24].

Среди типовых добычных машин большое количество примеров уже испытанных прототипов (рисунок 1.5). Примером успешного инструмента изъятия можно считать подводную добычную машину – Patania II компании Seatools для проекта Global Sea Mineral Resources (GSR) [15, 16, 17]. Техническими требованиями к проектированию являлись минимизация операционных рисков и нарушений графиков, баланс между прочностью и легкостью. Отдельной задачей стала разработка компенсаторов давления, а также клапанной коробки, которые должны были исправно функционировать при заданных условиях. Машина выполнена в виде бульдозера на гусеничном ходу, однако рабочий орган заменен на специально разработанный вакуумный захват [31, 32, 46]. Принцип работы заключается в создании зоны пониженного давления внутри патрубков, образованная разница давления окружающей акватории и вакуума в патрубках формируют восходящий поток двухфазной гидросмеси, проходящей через многочисленные сопла и поднимающей ТПИ на многоковшовую цепную решетку, перегружающая полезное ископаемое в отсек хранения [68, 78, 100]. Проведенные испытания машины подтверждают правильность выбранного решения по проектированию инструмента изъятия, а также демонстрируют высокие показатели производительности, полноты извлечения и энергоэффективности. В технологии GSR подъем на поверхность осуществляется при помощи группы параллельно работающих насосов, обеспечивая поточный способ транспортирования [49, 54, 88].

Примером удачного решения при исполнении морского судна можно назвать совместный проект компании Allseas и The Metals Company (TMC) судно Hidden Gem [22, 23, 24] (рисунок 1.6).



Hidden Gem, 2024



Nautilus New Era, 2022



Poseidon I, 2022

Рисунок 1.6 – Вспомогательные добычные суда международных проектов [24]

Корабль выполнен в классическом виде, и способен выполнять определённые важные функции, а именно: диспетчеризации, оснащения и контроля ТНПА; функция первичной переработки, дробления и складирования поднятого ТПИ; обеспечение ремонта и обслуживания подводных добычных модулей [65, 67, 97]. В технологии применяемой компанией Allseas используется эрлифтный подъем гидросмеси, сущность которого заключается в разбавлении двухфазного потока в вертикальном трубопроводе пузырьками газа, превращая его в трехфазный поток низкой плотности, именно поэтому на судне также располагается необходимое оборудование, в первую очередь компрессорная установка [24, 63]. Проведенные испытания подтвердили исправную работу каждого функционирующего узла, а также смогли продемонстрировать производительность в 86,4 т/час.

Таблица 1.2 – Испытания прототипов международных проектов по добыче глубоководных ТПИ [24]

Год	Организация	Страна	Место проведения испытаний	Глубина залегания, м.	ТПИ	Прототип
1978	ОМІ	Германия, США, Канада, Япония	Тихий Океан	5200	ЖМК	SEDCO-445
1978	ОМА	США, Бельгия, Италия	Тихий Океан	4570	ЖМК	-
1979	ОМСО	США, Голландия	Север Тихого Океана	5000	ЖМК	Hughes Glomar Explorer
1997	TRAM	Япония	Север Тихого Океана	2200	ЖМК	-
2000	NIOT	Индия, Германия	Индийский океан	410	ЖМК	Sagar Kanya
2001	COMRA	Китай	Озеро Фусянь	135	ЖМК	-
2006	NIOT	Индия	Индийский океан	541	ЖМК	Sagar Kanya

Продолжение таблицы 1.2

Год	Организация	Страна	Место проведения испытаний	Глубина залегания, м.	ТПИ	Прототип
2010	KORDI	Южная Корея	Восточное Корейское море	100	ЖМК	Mine Ro
2010	NIOT	Индия	Арабское море	512	ЖМК	Sagar Kanya
2013	KIOST	Южная Корея	Восточное Корейское море	1370	ЖМК	Mine Ro-II
2015	KIOST	Южная Корея	Восточное Корейское море	1200	ЖМК	Mine Ro-II
2016	COMRA, CRIMM	Китай	Южно-Китайское море	304	ЖМК	-
2017	GSR	Бельгия	Тихий Океан	4571	ЖМК	Patania-I
2017	JOGMEC	Япония	Тихий Океан	1600	ГПС	Poseidon-I
2018	Nautilus Minerals	Канада	Новогвинейское море	-	ГПС	-
2018	COMRA, CRIMM	Китай	Южно-Китайское море	514	ЖМК	Kunlong 500
2018	NIOT	Индия	Индийский океан	890	ЖМК	-
2018	INC Mining, Blue Nodules	Голландия, Европейский Союз	Средиземное море	300	ЖМК	Apollo-II
2018	CIMR	Китай	Южно-Китайское море	2019	КМК	Kunlong 2000
2018	IDSSE	Китай	Южно-Китайское море	2490	КМК	-
2019	GSR	Бельгия	Pacific Ocean	5471	ЖМК	Patania-II
2021	COMRA	Китай	Южно-Китайское море	1306	ЖМК	-
2022	TMC	Канада	Pacific Ocean	2400	ЖМК	Hidden Gem

Примечание: OMI (Ocean Management Incorporated); OMA (Ocean Mining Associates); OMCO (Ocean Minerals Company); TRAM (Technology Research Association of Manganese Nodules Mining System); COMRA (China Ocean Mineral Resource R&D Association); KORDI (The Republic of Korea Ocean Research and Development Institute); KIOST (The Republic of Korea Institute of Ocean Science and Technology); CRIMM (Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy)

Несмотря на успехи в разработке и внедрении отдельных компонентов, наиболее сложной частью любого подводного добычного комплекса остается система транспортировки [21, 23, 47]. Ее надежность, энергоэффективность и способность работать в условиях высоких гидростатических нагрузок определяют успешность всей операции по добыче ТПИ [110].

Циклический способ добычи

Циклический способ базируется на использовании специализированных грейферных устройств, которые опускаются на морское дно для сбора ТПИ, после чего поднимают их на поверхность. Устройство фиксируется на борту добывающего судна с помощью троса, приводимого в действие лебедочным механизмом. После выгрузки материала грейфер возвращается на дно для следующего цикла работы [62, 96].

Преимущества:

- Простота конструкции и эксплуатации, что делает этот метод доступным даже для ограниченного бюджета;
- Возможность точечного сбора материала, минимизирующая воздействие на экосистему;
- Относительно низкие затраты на разработку и обслуживание оборудования.

Недостатки:

- Низкая производительность, обусловленная циклическостью работы;
- Зависимость от погодных условий, которые могут ограничивать эффективность операций;
- Высокая вероятность износа тросов и механических повреждений оборудования из-за контакта с твердыми породами.

В России разработки циклических систем проводятся в рамках проектов РАН и профильных НИИ, таких как Институт океанологии им. П.П. Ширшова. Зарубежные примеры включают успешные испытания грейферных систем, проведенные японским агентством JAMSTEC, которые подтвердили эффективность метода для добычи железомарганцевых конкреций на глубинах до 2000 метров [77, 87, 107].

Поточный способ добычи

Поточный способ предполагает непрерывное перемещение ТПИ на поверхность с использованием гидротранспортных систем или эрлифта. Гидротранспорт создает мощный восходящий поток воды в вертикальной трубе,

который захватывает твердые частицы. Эрлифт, в свою очередь, использует сжатый воздух, создающий трехфазный поток и поднимающий материал к поверхности (рисунок 1.7).

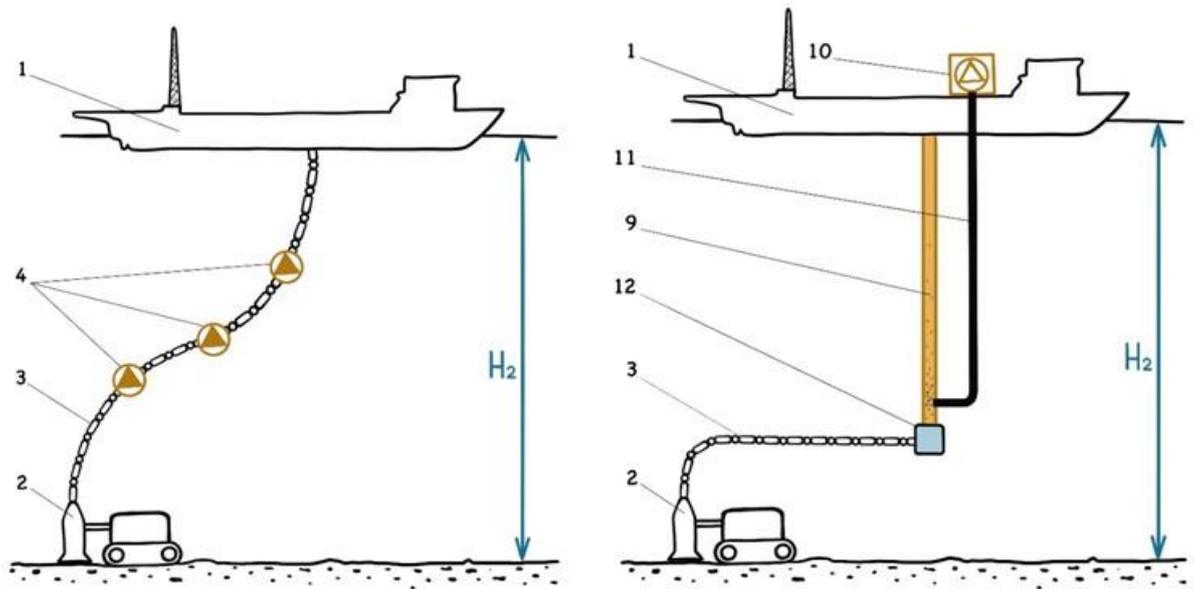


Рисунок 1.7 – Типовые схемы технологии поточного подъема твердых полезных ископаемых со дна: слева – насосная система гидроподъема; справа – эрлифтная система подъема; H_1 – глубина погружения промежуточной капсулы; H_2 – глубина акватории в месте залегания ТПИ [24]

1 – морское судно; 2 – подводная горная машина с инструментом изъятия; 3 – трубопровод положительной плавучести; 4- насосные установки; 9 – вертикальный трубопровод; 10 – компрессорная установка; 11 – воздухопровод; 12 – коллектор

Эрлифтная систему подъема включает в себя вертикальный трубопровод 9, компрессорную установку 10, установленную на морском судне, воздухопровод 11 и коллектор 12. Воздух под давлением генерируемый компрессорной установкой 10 подается по воздухопроводу 11 в трубопровод положительной плавучести 3, причем подключение воздухопровода к трубопровода осуществляется на некотором расстоянии от коллектора 12. Таким образом, в коллекторе образуется трехфазная гидросмесь, состоящая из воды, воздуха и твердого, которая перемещается на поверхность за счет разницы плотностей верхнего и нижнего слоев жидкости [27, 81, 106]. Несмотря на то, что технология является частным случаем поточного способа, потенциал такой системы весьма высок. Недостатком

такой системы является крайне низкий коэффициент полезного действия (около 25-30%), и как следствие низкая энергетическая эффективность [33].

Насосная система гидроподъема представляет из себя многозвенный трубопровод 3 с промежуточно расположенными насосами 4 и в зависимости от требуемых напорно-расходных характеристик возможна параллельная и/или последовательная установка нескольких насосов. ТПИ перемещаются по трубопроводу 3 в виде двухфазной гидросмеси за счет работы насосов 4 [6, 42, 86]. Этот способ обладает наибольшей производительностью, однако он обладает низкой надежностью, так как при выходе одного насосного комплекса из строя, весь комплекс останавливается до устранения неполадок [1, 36, 103].

Преимущества:

- Высокая производительность благодаря непрерывному процессу;
- Возможность работы на больших глубинах;
- Минимальные механические повреждения материала в процессе транспортировки.

Недостатки:

- Высокие энергозатраты, особенно при работе на глубинах более 3000 метров;
- Сложность управления потоками воды, требующая точного мониторинга параметров;
- Высокая стоимость разработки и внедрения оборудования.

Гидротранспортные системы активно исследуются в рамках российских проектов, поддерживаемых Минпромторгом и другими государственными структурами. Зарубежные компании, такие как немецкий GEOMAR и японская Deep Ocean Resources Development, продемонстрировали успешные результаты испытаний прототипов эрлифтов, способных поднимать материал с глубин до 5000 метров [57, 84, 86]. Однако вопросы энергоэффективности остаются актуальными.

Двухстадийный способ добычи

Двухстадийный метод представляет собой комбинированный подход, включающий промежуточный этап хранения ТПИ. На первой стадии материал

собирается и транспортируется в специальную капсулу, размещенную на промежуточной глубине [22, 50]. На второй стадии капсула поднимается на поверхность с использованием поточных или механических систем. Такой метод позволяет распределить нагрузку между различными этапами и повысить общую эффективность (рисунок 1.8).

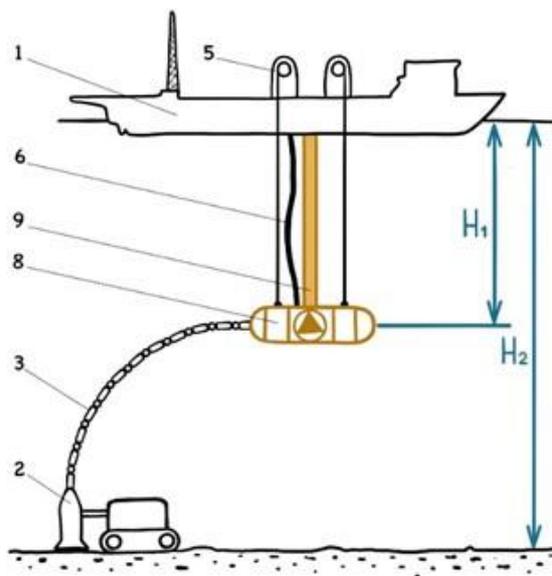


Рисунок 1.8 – Типовая схема технологии двухстадийного подъема твердых полезных ископаемых

H_1 – глубина погружения промежуточной капсулы; H_2 – глубина акватории в месте залегания ТПИ [24]

1 – морское судно; 2 – подводная горная машина с инструментом изъятия; 3 – трубопровод положительной плавучести; 5 – судовые лебедки; 6 – гибкий воздуховод; 8 – промежуточная капсула с насосным оборудованием; 9 – вертикальный трубопровод

Двухстадийный подъем подразумевает наличие промежуточной капсулы с насосным оборудованием 8, обеспечивающей частичный подъем за счет энергии гидростатического напора, обусловленного глубиной погружения капсулы и наличием в ней атмосферного давления, которое поддерживается по гибкому воздуховоду 6. Это первая стадия подъема, на которой нет энергетических затрат силового оборудования. Вторая стадия подъема – из капсулы до морского судна осуществляется за счет работы насоса, расположенного в капсуле 8 по вертикальному трубопроводу 9. Этот способ обладает значительно большими энергозатратами по сравнению с предыдущим, по причине высокого потребного

напора для осуществления подъема в атмосферной среде и преодолении гравитационных сил. Спускоподъемные операции осуществляются судовыми лебедками 5 [25, 104].

Преимущества:

- Снижение нагрузки на оборудование, работающее на больших глубинах;
- Гибкость технологии, позволяющая адаптировать ее к различным глубинам и условиям;
- Возможность увеличения производительности за счет оптимизации промежуточных этапов.

Недостатки:

- Высокая сложность конструкции и управления системой;
- Значительные капитальные затраты на создание инфраструктуры;
- Необходимость точной координации процессов на всех стадиях.

Российские научно-исследовательские институты ведут разработки двухстадийных технологий в рамках государственных программ и международных проектов. В США и Южной Корее крупные компании, такие как Lockheed Martin и Hyundai Heavy Industries, проводят испытания прототипов капсул для промежуточного хранения. Южнокорейские испытания на глубинах до 1500 метров подтвердили надежность систем, но их масштабное внедрение требует дополнительных инвестиций (таблица 1.3) [111].

Таблица 1.3 – Сравнительный анализ существующих технологий подъема

Параметр	Цикличный способ	Поточный способ	Двухстадийный способ
Производительность	Низкая	Высокая	Средняя
Энергозатраты	Низкие	Высокие	Средние
Техническая сложность	Низкая	Высокая	Высокая
Затраты на внедрение	Низкие	Высокие	Высокие
Подходящие глубины	До 2000 м	До 5000 м	До 5000 м

1.3 Оценка энергоэффективности технологий подъема

При реализации технологии глубоководной добычи твердых полезных ископаемых наиболее важным фактором является энергетическая эффективность. Энергетическая эффективность – это удельная характеристика, показывающая потребность энергии для добычи 1 единицы продукта (в случае с ЖМК – 1 тонны продукции) (1.1).

$$R = E/A, \quad (1.1)$$

где E – энергозатраты, кВт/ч,

A – производительность системы подъема, т/ч.

Формулы для определения энергозатрат и производительности представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Расчет производительности и потребляемой энергии типовых технологий подъема [24]

Система	Энергозатраты, кВт·ч	Производительность, т/ч
Циклическая	$n \cdot \frac{S_k \cdot v_{под}}{\mu_n}$	$\frac{V_k \cdot k \cdot \rho_{пи}}{T}$
Поточная (насос)	$n \cdot \frac{\rho_{см} \cdot g \cdot H}{\mu}$	$v_{см} \cdot \omega_{тр} \cdot C_{об}$
Поточная (эрлифт)	$n \cdot \frac{\rho_{см} \cdot g \cdot H}{\mu} + N$	$v_{см} \cdot \omega_{тр} \cdot C_{об}$
Поточная двустадийная	$n \cdot \frac{\rho_{см} \cdot g \cdot H}{\mu} + n \cdot \frac{S_k \cdot v_{под}}{\mu_n}$	$v_{см} \cdot \omega_{тр} \cdot C_{об}$

S_k – тяговое усилие каната, Н; $v_{под}$ – скорость подъема сосуда, м/с; n – количество силовых агрегатов (насос или лебедка), шт.; μ_n – КПД механизма; V_k – полезный объем ковша, м³; $\rho_{см}$ – плотность гидросмеси кг/м³; $\rho_{пи}$ – плотность полезного ископаемого кг/м³; H – потребный напор системы, м.; $C_{об}$ – объемная концентрация гидросмеси; N – мощность компрессора для эрлифта, кВт/ч ($N \approx 2500$ кВт/ч); $v_{см}$ – скорость смеси, м/с; $\omega_{тр}$ – живое сечение трубопровода, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²;

Расчет циклической технологии подъема осуществлялся по методике [24]. Основным исполнительным органом при таком способе подъема является сам грейфер, таким образом, операции добычи и подъема совмещены в одном аппарате. Производительность в таком случае рассчитывается по следующей формуле (1.2):

$$G = \frac{V_k \cdot k \cdot \rho_{\text{пш}}}{T}, \quad (1.2)$$

где V_k – внутренний объем грейфера, м³,

k – коэффициент заполнения внутреннего объема ТПИ,

T – время цикла, ч.

В свою очередь, время цикла рассчитывается следующим образом (1.3):

$$T = (t_{\text{погр}} + t_{\text{загр}} + t_{\text{подъема}} + t_{\text{разг}} + t_{\text{всп}}) \cdot 1,1, \quad (1.3)$$

где $t_{\text{погр}}$ – время, затрачиваемое на погружение, ч,

$t_{\text{загр}}$ – время, затрачиваемое на загрузку, ч,

$t_{\text{подъема}}$ – время, затрачиваемое на подъем, ч,

$t_{\text{разг}}$ – время, затрачиваемое на разгрузку, ч,

$t_{\text{всп}}$ – время, затрачиваемое на вспомогательные операции, ч.

Стоит отметить, что значение объема грейфера и коэффициент его заполнения выбраны с учетом необходимости конкурировать с другими вариантами подъема. Таким образом, можно сказать, что нами принята максимально возможная производительность циклического способа подъема и изменение параметров не окажет характерного влияния на сравнение систем [24].

Для осуществления спуско-подъемных операций грейфера необходима лебедка с приводным оборудованием. В таком случае мощность лебедки рассчитывается по следующей формуле (1.4):

$$N = n \cdot \frac{S_k \cdot v_{\text{под}}}{\mu_n}, \quad (1.4)$$

где S_k – тяговое усилие каната, Н,

$v_{\text{под}}$ – скорость подъема грейфера, м/с,

n – количество потребных лебедок, шт,

μ_n – КПД механизма.

Таким образом, ключевым параметром, влияющим на мощность, является тяговое усилие каната, так как данные параметров зависят от глубины погружения лебедки, за счет линейно возрастающей массы каната. Стоит отметить, что при опускании грейфер погружается под действием силы тяжести в свободном падении. Таким образом, необходимая мощность лебедки будет определяться

временем подъема [24].

Расчет мощности поточных систем связан с определением гидравлической мощности потока (1.5):

$$N = \rho_{\text{см}} \cdot g \cdot H \cdot Q, \quad (1.5)$$

где Q – расход гидросмесей, м³/с,

$\rho_{\text{см}}$ – плотность гидросмеси, кг/м³,

H – потребный напор гидротранспортной системы, м.

Гидротранспортной машиной, осуществляющей подъем гидросмеси, является насос с приводным оборудованием, поэтому для оценки энергетических затрат формула (5) преобразуется в формулы, представленные в таблице 1.4 для соответствующей поточной технологии [24].

Расчет производительности любой поточной системы может быть оценен массовым расходом системы при заданной объемной концентрации $C_{\text{об}}$ (1.6):

$$Q_{\text{ТВ}} = C_{\text{об}} \cdot v_{\text{см}} \cdot \omega_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пи}}, \quad (1.6)$$

где $Q_{\text{ТВ}}$ – производительность поточной транспортной системы, т/с,

$v_{\text{см}}$ – скорость смеси, м/с,

$\omega_{\text{тр}}$ – живое сечение трубопровода, м²,

$\rho_{\text{пи}}$ – плотность твердого вещества, т/м³.

При этом производительность поточной системы также можно выразить через расход гидросмеси (1.7):

$$Q_{\text{ТВ}} = C_{\text{об}} \cdot Q \cdot \rho_{\text{пи}}. \quad (1.7)$$

Стоит отметить, что скорость смеси задавалась с учетом выполнения условия гидроподъема твердого вещества заданной крупности и концентрации. Для объективной оценки производительности представленных поточных транспортных систем объемная концентрация и живое сечение трубопровода выбирались одинаковыми [24].

Как видно из формулы (1.5), при соблюдении равенства производительности ключевым параметром, влияющим на энергозатраты, является потребный напор гидротранспортной системы. Потребный напор эрлифтной системы можно определить следующим образом (1.8):

$$H = \Delta h_{\text{под}} + \Delta h_{\text{тр.вс}} + \Delta h_{\text{м}} + \Delta h_{\text{тр.нг}} + \Delta h_{\text{уск}} + \Delta h_0, \quad (1.8)$$

где $\Delta h_{\text{под}}$ – потери напора на поддержание твердой фракции во взвеси, м,

$\Delta h_{\text{тр.вс}}$ – потери напора на трение во всасывающей линии трубопровода, м,

$\Delta h_{\text{м}}$ – потери напора на преодоление местных сопротивлений во всасывающей линии, м,

$\Delta h_{\text{тр.нг}}$ – потери напора на трение в нагнетательной линии, м,

$\Delta h_{\text{уск}}$ – потери напора на ускорение смеси, м.

Основная часть потребного напора складывается из потерь напора на трение во всасывающей и нагнетательной линиях трубопровода, которые в свою очередь зависят от длины трубопровода, определяемого глубиной разработки [24, 59].

Потребный напор насосной системы зависит от удельных потерь напора, которые складываются из потерь напора на течение чистой воды I_0 , дополнительных потерь напора на преодоление сопротивлений, вызванных перемещением твердых частиц, взвешивания столба гидросмеси $\sum I$ и местных потерь напора и могут быть определены по формуле (1.9):

$$I_{\text{см}} = I_0 \cdot (k + \sum I) = \left\{ \lambda \frac{v_{\text{см}}^2}{2gD} \left[k + 145 \cdot c_0 \frac{gD}{v_{\text{см}}^2} \cdot \frac{w}{\sqrt{gD}} \right] \right\}, \quad (1.9)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления, который в общем виде является функцией числа Рейнольдса (Re) и относительной шероховатости (ε), т.е.

$\lambda = f(Re, \varepsilon)$, однако для развитого турбулентного режима движения гидросмеси, характерного для трубопроводного транспорта, коэффициент гидравлических сопротивлений можно определить по известной формуле Шифринсона $\lambda = 0,11(\varepsilon)^{0,25}$,

D – диаметр трубопровода, м,

$v_{\text{см}}$ – скорость потока, м/с,

w – скорость свободного падения твердых частиц в воде (гидравлическая крупность), м/с,

k – коэффициент, учитывающий местные потери напора и несложную геометрию вертикального трубопровода.

Удельные потери напора отнесены к длине трубопровода, поэтому для

определения потребного напора системы можно воспользоваться формулой (1.10):

$$H = I_{\text{см}} \cdot L, \quad (1.10)$$

где L – длина трубопровода, зависящая от глубины разработки, м.

Область применимости добычных технологий

Ввиду широкого распространения ЖМК по морскому дну и, как следствие, разнообразных глубин залегания следует определить границы применимости технологий. В рамках реализации глубоководного комплекса необходимо учитывать не только финансовую составляющую, но также и энергетическую. На рисунке 1.9 видно, что при увеличении глубины разработки месторождения энергоёмкость процесса подъема увеличивается во всех случаях [24].

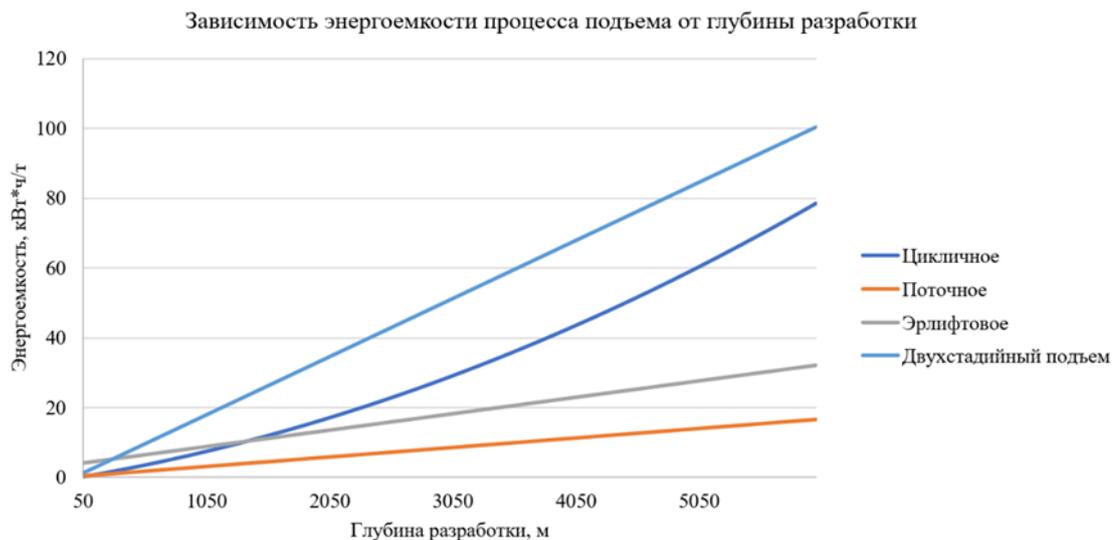


Рисунок 1.9 – Энергетическая эффективность существующих технологий подъема глубоководных ТПИ

Все представленные технологии демонстрируют значительное увеличение энергозатрат по мере углубления добычных операций. Это связано с увеличением гидростатического давления и сопротивления среды, которые требуют дополнительных энергетических ресурсов для подъема материала.

Циклический метод подъема показывает самый значительный рост энергоёмкости на больших глубинах. Это объясняется многократным использованием тросовых систем, где требуется дополнительная энергия для компенсации веса троса и устойчивости грейфера на глубине, а также низкой производительностью грейфера. Однако сравнивая исключительно энергозатраты,

циклический метод является самым энергетически экономичным способом подъема.

Поточный метод (гидротранспорт) и эйрлифт демонстрируют более умеренный рост энергозатрат, особенно на средних глубинах (до 3000 м). Однако на глубинах более 4000 м их энергоемкость предполагает наличие бесперебойного и достаточно мощного источника питания.

Двухстадийный подъем обладает наибольшими удельными энергозатратами по сравнению с остальными вариантами, однако преодоление 60% пути до поверхности без дополнительных энергозатрат, исключительно за счет разницы гидростатических напоров, доказывает наличие потенциала у данной технологии.

1.4 Выводы по главе 1

1) Глубоководные месторождения ТПИ — это стратегический резерв редких металлов, который имеет ряд преимуществ перед континентальными месторождениями. Несмотря на сложности разработки, высокое содержание полезных элементов и уникальные условия формирования делают эти ресурсы приоритетными для исследований и инвестиций. Усилия должны быть сосредоточены на создании современных технологий добычи, которые позволят минимизировать воздействие на экосистемы и эффективно использовать стратегические ресурсы.

2) Анализ существующих технологий добычи глубоководных ТПИ демонстрирует, что выбор метода зависит от множества факторов, включая характеристики месторождения, глубину залегания, экономические ограничения и экологические требования. Циклический метод остается наиболее подходящим для локальных разработок на малых и средних глубинах. Поточные системы предлагают высокую производительность, но требуют значительных энергетических ресурсов. Двухстадийные технологии, хотя и обладают потенциалом для работы на больших глубинах, нуждаются в дальнейшей оптимизации и снижении затрат. Будущие разработки должны сосредоточиться на создании энергоэффективных и экологически безопасных решений, которые позволят обеспечить устойчивое освоение ресурсов мирового океана.

3) Система подъема является наиболее энергоемким и сложным элементом

добычного комплекса. Для эффективного освоения глубоководных месторождений необходимо сосредоточить усилия на разработке гибридных и энергоэффективных решений, которые снизят затраты на подъем материала, особенно на глубинах свыше 3000 м. Двухстадийный способ, несмотря на его высокую сложность, представляет наибольший потенциал для снижения энергозатрат.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОПОДЪЕМА КОНКРЕЦИИ ПРИ ПОМОЩИ КАПСУЛЫ

2.1 Циклично-поточная технология подъема конкреций с Морского дна

Технология глубоководной добычи твёрдых полезных ископаемых с применением промежуточной подводной капсулы [17] представляет собой комплексный метод освоения минеральных ресурсов с морского дна, основанный на оптимизации логистических, энергетических и экологических процессов. Ключевым элементом системы является специальная капсула (промежуточная капсула), размещаемая непосредственно под водой в зоне разработки, которая обеспечивает временное хранение и упрощённую транспортировку добытой горной массы. Данная капсула выполнена в герметичной конструкции и оснащается системой управления плавучестью, что позволяет ей как стабильно удерживаться под водой, так и подниматься к поверхности при необходимости выгрузки. Тем самым снижается нагрузка на энергетическую инфраструктуру, так как нет постоянной необходимости перегонять материал по вертикальным трубопроводам на значительную глубину, а также повышается безопасность технологического процесса за счёт уменьшения воздействия внешних погодных факторов.

На первом этапе производственного цикла к участку залегания полезных ископаемых опускается горнодобывающее оборудование, которое может включать дистанционно управляемые аппараты, оснащённые манипуляторами, режущими или буровыми инструментами. Данные средства, в зависимости от структуры и типа полезного ископаемого (ЖМК, КМК, ГПС), осуществляют механическую добычу сырья с донной поверхности или небольшого заглубления, а при необходимости — первичную сортировку и дробление для облегчения транспортировки. С помощью системы трубопроводов и разницы гидростатического давления на дне акватории и внутри капсулы, поступающая порода направляется непосредственно в промежуточную капсулу, которая находится в рабочем положении на заранее определённой глубине. Данная глубина выбирается исходя из гидростатических и логистических соображений, чтобы

свести к минимуму гидравлические потери и тем самым оптимизировать энергетическую эффективность [17, 26].

Важным аспектом технологии является способность капсулы обеспечить значительный запас объёма для хранения добытой горной массы, что позволяет роботизированным комплексам функционировать практически непрерывно без ожидания очередного цикла подъёма породы. Когда ёмкость капсулы достигает расчётного уровня заполнения, запускается процесс транспортировки на поверхность, который может быть реализован как за счёт изменения плавучести (путём закачки или откачки балластной воды, а также использования сжатого воздуха), так и при помощи лебёточно-тросовых систем, размещённых на надводной платформе или специализированном судне. На поверхности содержимое капсулы выгружается в соответствующие приёмные бункеры или перерабатывающие установки, после чего капсула вновь погружается к месту добычи [17]. Подобная ротация одной или нескольких капсул даёт возможность организовать поэтапный непрерывный процесс добычи: пока одна капсула выгружается, вторая наполняется, а основное оборудование продолжает работать.

С технологической точки зрения центральная идея патента направлена на повышение эффективности и уменьшение совокупных затрат на подъём больших объёмов руды с глубин, которые могут достигать нескольких тысяч метров. Традиционные способы, подразумевающие постоянный пропуск частиц породы через вертикальные магистрали, требуют многоступенчатую насосную инфраструктуру и значительные энергетические затраты. Применение промежуточной капсулы позволяет исключить насосное оборудование из трубопроводов, сводя энергозатраты к минимальным значениям, а также эффективно адаптировать систему к переменным условиям добычи и изменениям в геологических характеристиках месторождения. Более того, конструкция капсулы может быть доработана с учётом особенностей конкретного региона и видовых ресурсов: регулируемая толщина стенок, усиленная защита от коррозии, система мониторинга параметров окружающей среды (температуры, давления и пр.) и встроенные датчики для предотвращения перегрузок [25].

Дополнительное преимущество данного метода состоит в повышенном уровне промышленной безопасности. Поскольку подводная капсула расположена непосредственно на дне или в толще воды, риск её повреждения при неблагоприятных метеоусловиях существенно снижается. При штормах или сильном ветре судно-носитель может отойти на более безопасное расстояние, в то время как сама капсула продолжает выполнять функцию хранения добытого сырья. Также при условии герметичного исполнения системы минимизируется вероятность утечек, что положительно сказывается на экологической обстановке. Также при соблюдении корректных регламентов работы горнодобывающих аппаратов и применения соответствующих фильтрующих систем возможно существенно снизить объём взмучивания донных отложений, чем обеспечивается дополнительная защита морской флоры и фауны.

Циклично-поточная технология подъёма ЖМК представляет собой последовательную реализацию нескольких взаимосвязанных технологических этапов, основанных на использовании гидростатической энергии водной среды и особенностях потоковой транспортировки многокомпонентной смеси.

Процесс начинается с погружения трубопроводной системы, соединенной с промежуточной капсулой, в область скопления железомарганцевых конкреций. Гидростатическое давление, обусловленное разностью уровней воды в верхней части системы и на дне, способствует движению жидкой фазы, которая несет в себе твердые частицы.

В результате создается восходящий поток, который направляет смесь в полость промежуточной капсулы. В промежуточной капсуле происходят процессы временного накопления и разделения компонентов смеси. Твердые частицы концентрируются за счёт силы тяжести, а избыток жидкости либо частично возвращается в окружающую среду, либо перемещается для дальнейшего использования в процессе. При этом использование специальных клапанов и систем управления потоками позволяет оптимизировать процесс возврата жидкости и минимизировать потери. Принципиальная схема циклично-поточной технологии представлена на рисунке 2.1.

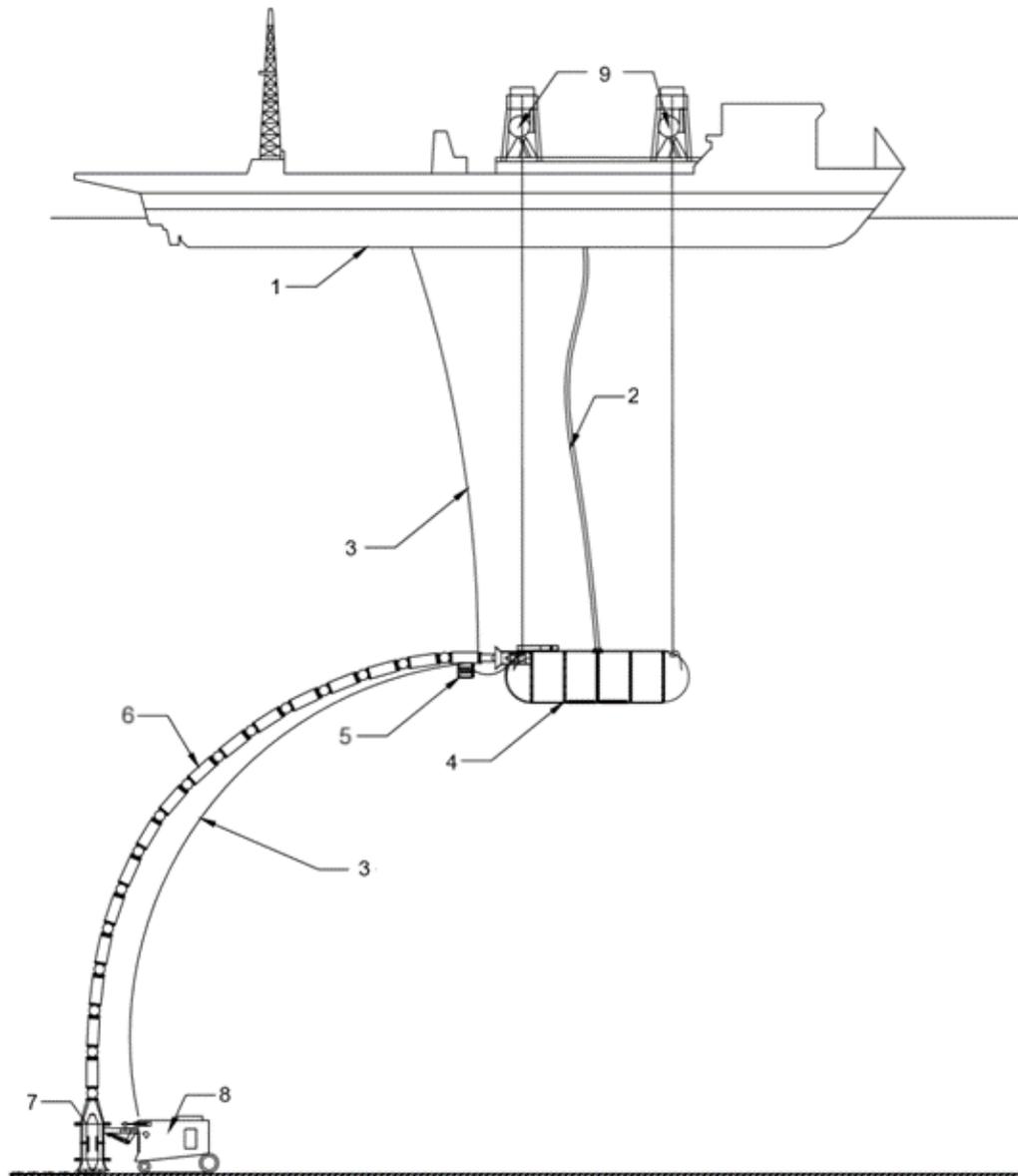


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема циклично-поточной технологии [17]

1 – вспомогательное судно; 2 – гибкий трубопровод, обеспечивающий постоянное сообщение с атмосферой; 3 – силовой шлангокабель; 4 – промежуточная капсула с атмосферным воздухом; 5 – система подтягивания и позиционирования; 6 – многозвенный трубопровод положительной плавучести; 7 – рабочий орган добычного аппарата; 8 – добычной аппарат; 9 – кабельно-лебедочная система

Основной механизм наполнения промежуточной капсулы основан на гидростатическом давлении, которое заставляет жидкость со взвешенными твердыми частицами перемещаться по трубопроводам в направлении зоны с более низким давлением. Это достигается за счёт градиента давления, создаваемого разницей в плотностях и высотах жидкостей. По мере наполнения капсулы смесь уплотняется, что способствует более эффективному разделению твердых частиц и

воды. При накоплении определённого объёма материала система автоматически герметизирует капсулу, предотвращая утечку содержимого, после чего смесь транспортируется на поверхность с использованием дополнительного подъемного оборудования, такого как насосы или подъемники. Затем капсула возвращается в исходное положение, и цикл повторяется, что делает процесс непрерывным [17].

Особенностью данного способа является его адаптивность к условиям морской среды. Например, возможно использование специализированных материалов трубопроводов и капсул, устойчивых к коррозии и высокому давлению. Это позволяет увеличить срок службы оборудования и снизить эксплуатационные расходы. Кроме того, применение автоматизированных систем управления процессом обеспечивает точный контроль параметров, таких как скорость потока, объём транспортируемого материала и время наполнения капсулы. Эти улучшения позволяют достигать максимальной эффективности процесса даже при сложных гидрологических условиях.

Промежуточная капсула состоит из корпуса 1 (рисунок 2.2), который выполнен из полимерного материала, в форме полого цилиндра со свободным объемом, заполняемой смесью жидкости и твердого компонента, а торцевые части в форме полусфер (рисунок 2.3).

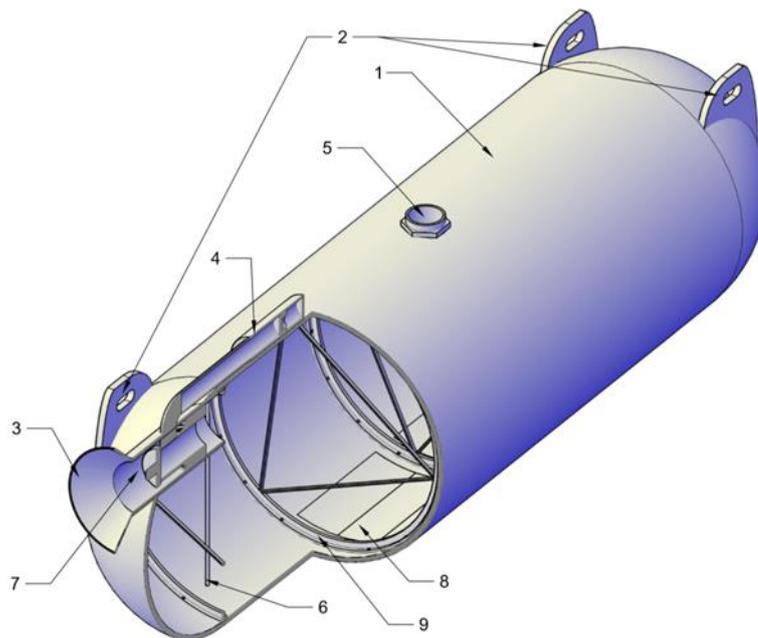


Рисунок 2.2 – Промежуточная капсула для подъема твердых полезных ископаемых со дна мирового океана

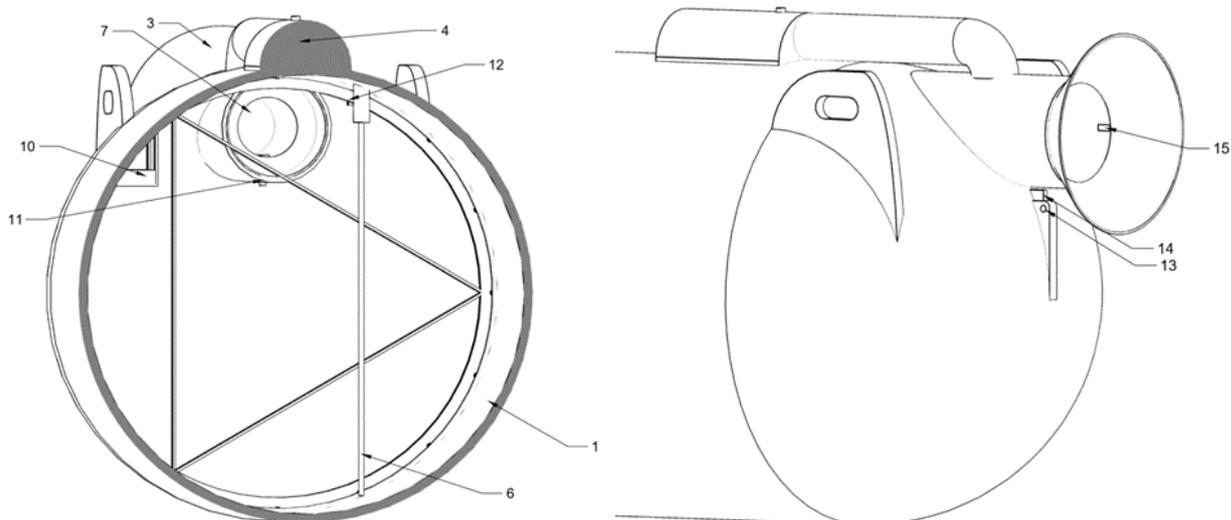


Рисунок 2.3 – Сечение капсулы

Сверху торцевых частей корпуса 1, жестко закреплены проушины 2. Сверху в центре корпуса 1 жестко закреплена муфта фитингового соединения 5, через которую соединена с возможностью съема трубчатая магистраль, включающая рукав высокого давления и кабель сообщения между регистрирующей аппаратурой 10 и диспетчерской на вспомогательном судне. В передней торцевой части корпуса 1 установлена муфта быстроразъемного соединения 7, к которой снаружи закреплен с возможностью съема улавливающий кожух 3. Внутри муфты быстроразъемного соединения 7 установлен датчик контроля соединения 15 и кориолисовый массовый расходомер 11, выходы которых соединены со входом регистрирующей аппаратуры 10. Регистрирующая аппаратура 10 закреплена в отдельной секции внутри передней части корпуса 1, ее выход соединен со входом диспетчерского устройства на вспомогательном судне. Сверху в передней части корпуса 1 жестко закреплен гидроаккумулятор 4, соединенный с муфтой быстроразъемного соединения 7 с трубопроводом. Внизу центральной части корпуса 1 выполнены отверстия в форме квадратов, в которые установлены крышки разгрузочного люка 8. Внутри корпуса 1 установлен ряд подкрепляющих стенку и жестко прикреплены к ней круговых силовых колец 9. Внутри корпуса 1, под верхней его частью, закреплены с возможностью съема датчик уровня жидкости 6 и внутренний датчик давления 12, выходы которых соединены со входом регистрирующей аппаратуры 10. Капсула содержит свободный объем заполняемой смесью жидкости и твердого компонента. В центре передней

торцевой части корпуса 1 жестко закреплена торцевая проушина 13. На проушине закреплён с возможностью съёма внешний датчик давления 14, выход которого соединён со входом регистрирующей аппаратуры 10 [17].

2.2 Основные параметры промежуточной капсулы

Среди множества параметров капсулы, выделим необходимые для построения корректных моделей и проведения расчетов, оценки состояния, обоснования конструкции, а также для обоснования выбора конкретных геометрических размеров и формы капсулы [21, 24].

Основными техническими требованиями выделим производительность и энергозатраты. В общем виде, годовая производительность циклично-поточного способа транспортирования определяется по формуле (2.1):

$$A_r = A \cdot 24 \cdot N, \text{ т/год}, \quad (2.1)$$

где, A – часовая производительность технологии, т/час,

N – количество рабочих дней в году.

Таким образом, часовая производительность может быть определена по следующей формуле (2.2):

$$A = \frac{V_b \cdot \rho_{\text{ПИ}} \cdot X \cdot Z}{T \cdot 1000}, \text{ т/час}, \quad (2.2)$$

где, V_b – внутренний объем капсулы, м³,

X - концентрация полезного компонента в пульпе, %,

Z – коэффициент заполнения внутреннего объема капсулы, %,

$\rho_{\text{ПИ}}$ - плотность полезного ископаемого, кг/м³,

T - время цикла (опускание, загрузка, подъем, разгрузка), с.

Внутренний объем капсулы – является полезным объемом капсулы, который может быть заполнен для транспортирования ПИ на поверхность. Определяется в зависимости от геометрических параметров и формы капсулы.

Коэффициент заполнения внутреннего объема капсулы в данной работе принимается равным 90 %, однако в действительности коэффициент будет соответствовать 80-85 %. Для определения данного коэффициента, необходимо проведение отдельного исследования.

Концентрация полезного компонента в пульпе выбирается исходя из

прототипных испытаний эрлифтога и поточного способа, для создания равных и одинаковых условий эксплуатации. В этой связи, значение концентрации принимается равным 3 %, при условии отсутствия процесса придонного пульпоприготовления [98].

Время цикла определяется следующей формулой (2.3):

$$T = (t_{\text{погр}} + t_{\text{загр}} + t_{\text{подъема}} + t_{\text{разг}} + t_{\text{всп}}) \cdot 1.1, \quad (2.3)$$

где, $t_{\text{погр}}$ – время, затрачиваемое на погружение, с,

$t_{\text{загр}}$ – время, затрачиваемое на загрузку, с,

$t_{\text{подъема}}$ – время, затрачиваемое на подъем, с,

$t_{\text{разг}}$ – время, затрачиваемое на разгрузку, с,

$t_{\text{всп}}$ – время, затрачиваемое на вспомогательные операции, с.

Рассмотрим каждое слагаемое формулы (2.3) отдельно. Тогда для определения времени погружения воспользуемся формулой (2.4):

$$t_{\text{погр}} = \frac{H}{v_k}, \quad (2.4)$$

где H – глубина погружения капсулы, м,

v_k – критическая скорость погружения капсулы, м/с.

На тело, тонущее в воде, действуют силы, действующие в противоположные направления. Силы действуют постоянно, но не с одинаковым усилием. В конечном итоге, при продолжительном погружении, наступает этап, когда скорость погружения становится постоянной и силы, действующие на тело, уравновешивают друг друга. Эта скорость называется критической скоростью капсулы и определяется по следующей формуле (2.5):

$$v_k = \sqrt{\frac{2 \cdot (mg - \rho V g)}{\rho C_d S}}, \quad (2.5)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²,

V – полный объем капсулы, м³,

C_d – коэффициент лобового сопротивления, зависящий от формы и ориентации объекта, а также от режима обтекания (ламинарный/турбулентный, число Рейнольдса и т.д.),

S – миделево сечение капсулы, м^2 ,

m – масса капсулы, кг ,

ρ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Коэффициент C_d (drag coefficient) для тела в потоке воды (или воздуха) показывает, насколько «обтекаемой» является форма. Чем выше C_d , тем сильнее сопротивление и тем ниже установившаяся скорость падения при прочих равных условиях.

Миделевым сечением называется сечение тела перпендикулярное потоку жидкости. Так как мы предполагаем, что капсула опускается перпендикулярно поверхности жидкости, то миделево сечение является проекцией тела на морское дно.

Масса капсулы определяется по следующей формуле (2.6):

$$m = \rho_T \cdot V, \quad \text{кг}/\text{м}^3, \quad (2.6)$$

где ρ_T – плотность капсулы, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Плотность тела зависит от материала используемого для создания капсулы и определяется по формуле (2.7):

$$\rho_T = Y \cdot \rho_{\text{мат}} + (1 - Y) \cdot \rho_{\text{заполнителя}}, \quad \text{кг}/\text{м}^3, \quad (2.7)$$

где Y – процент материала в капсуле, %,

$\rho_{\text{мат}}$ – плотность материала капсулы, $\text{кг}/\text{м}^3$,

$\rho_{\text{заполнителя}}$ – плотность заполнителя капсулы (подразумевается воздух), $\text{кг}/\text{м}^3$.

Процент содержания материала в капсуле определяется по следующей формулам (2.8):

$$Y = \frac{V - V_B}{V}, \quad (2.8)$$

Следующим слагаемым временем цикла является время загрузки (заполнения) капсулы. Определяется по формуле (2.9):

$$t_{\text{загр}} = \frac{V_B}{Q}, \quad (2.9)$$

где Q – расход пульпы в пульпопроводе, $\text{м}^3/\text{с}$.

Расход пульпы зависит от производительности добычного устройства и определяется по формуле (2.10):

$$Q = \frac{G}{\rho_{\text{ПИ}} \cdot X_0}, \quad (2.10)$$

где G – производительность придонного оборудования, кг/с,

X_0 – объемная концентрация, %.

Объемная концентрация определяется по следующей формулам (2.11):

$$X_0 = \frac{\frac{X}{\rho_{\text{ПИ}}}}{\frac{X}{\rho_{\text{ПИ}}} + \frac{(1-X)}{\rho_{\text{вод}}}}, \quad (2.11)$$

Следующим слагаемым времени цикла является время подъема капсулы. Время подъема напрямую зависит от мощности лебедки и определяется по формуле (2.12):

$$t_{\text{подъема}} = \frac{H}{v_{\text{подъема}}}, \quad (2.12)$$

где $v_{\text{подъема}}$ – скорость подъема капсулы, м/с.

Скорость подъема можно найти по формуле (2.13):

$$v_{\text{подъема}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{Б}} \cdot n_{\text{ном}}}{60 \cdot i_{\text{ред}}}, \quad (2.13)$$

где $D_{\text{Б}}$ – диаметр барабана лебедки, м,

$n_{\text{ном}}$ – частота вращения барабана, об/мин,

$i_{\text{ред}}$ – передаточное число редуктора.

Диаметр барабана можно найти по формуле (2.14):

$$D_{\text{Б}} = 80 \cdot d_{\text{кан}}, \quad (2.14)$$

где $d_{\text{кан}}$ – диаметр лебедки каната, м.

Для того чтобы найти диаметр барабана надо знать необходимо необходимый диаметр каната, который определяется в зависимости от потребного тягового усилия и определяется по формуле (2.15):

$$d_{\text{кан}} = R \cdot \sqrt[3]{S_{\text{кан}}}, \quad (2.15)$$

где $S_{\text{кан}}$ – максимальное тяговое усилие каната, кН,

R – эмпирический переводной коэффициент, зависящий от назначения каната ($R=7\dots9$).

Тяговое усилие каната напрямую зависит от силы сопротивления подъема и определяется по формуле (2.16):

$$S_{\text{кан}} = k_{\text{дин}} \cdot F \quad (2.16)$$

где $k_{\text{дин}}$ – коэффициент динамичности, зависящий от режима подъема ($k_{\text{дин}} = 1 \dots 1,5$),

F – сила сопротивления подъему, Н.

Задаваясь только вертикальным подъемом, можно определить направления действующих сил и рассчитать значение усилия по формуле (2.17):

$$F = m_{\Gamma} \cdot g + F_d, \quad (2.17)$$

где m_{Γ} – масса поднимаемой капсулы (загруженной), кг,

F_d – сила гидродинамического (лобового) сопротивления, Н.

Масса поднимаемой капсулы зависит от множества показателей, в частности от геометрической формы, процента заполнения и содержания полезного компонента в пульпе и определяется по формуле (2.18):

$$m_{\Gamma} = m + V_{\text{в}} \cdot X \cdot \rho_{\text{ПИ}} + V_{\text{в}} \cdot (1 - X) \cdot \rho_{\text{в}}, \quad (2.18)$$

Сила лобового сопротивления определяется по формуле (2.19):

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_{\text{в}} S v_{\text{подъема}}^2, \quad (2.19)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³,

S – характерная «лобовая» площадь поперечного сечения тела (как правило, проектируемая площадь на перпендикулярную к потоку плоскость), м².

Время, затрачиваемое на разгрузку и вспомогательные операции постоянно, и определяется исходя из технологических регламентов.

Для определения энергозатрат, воспользуемся формулой из циклической технологии, так как в транспортной системе потребителем энергии является лишь лебедка (или лебедки) (2.20):

$$E = n \cdot \frac{S_{\text{кан}} \cdot v_{\text{под}}}{\mu_n}, \quad (2.20)$$

где $S_{\text{кан}}$ – тяговое усилие каната, Н,

$v_{\text{под}}$ – скорость подъема капсулы, м/с,

n – количество силовых агрегатов (лебедка), шт,

μ_n – КПД механизма.

Таким образом, для определения основных характеристик главным образом

необходимо знать такие параметры как: скорость (погружения и подъема); геометрические размеры (толщину стенки капсулы, объем); форму; массу (плотность).

2.3 Обоснование рациональной формы промежуточной капсулы

Исследование процесса погружения капсулы в жидкую среду требует детального анализа сил, действующих на тело при его движении в жидкости. При погружении объекта в жидкость основными действующими силами являются сила тяжести, выталкивающая сила (сила Архимеда) и гидродинамическое (лобовое) сопротивление. Сила тяжести определяется массой объекта и ускорением свободного падения, выталкивающая сила — объемом вытесненной жидкости и её плотностью, а сила гидродинамического сопротивления существенно зависит от формы и ориентации объекта (рисунок 2.4).

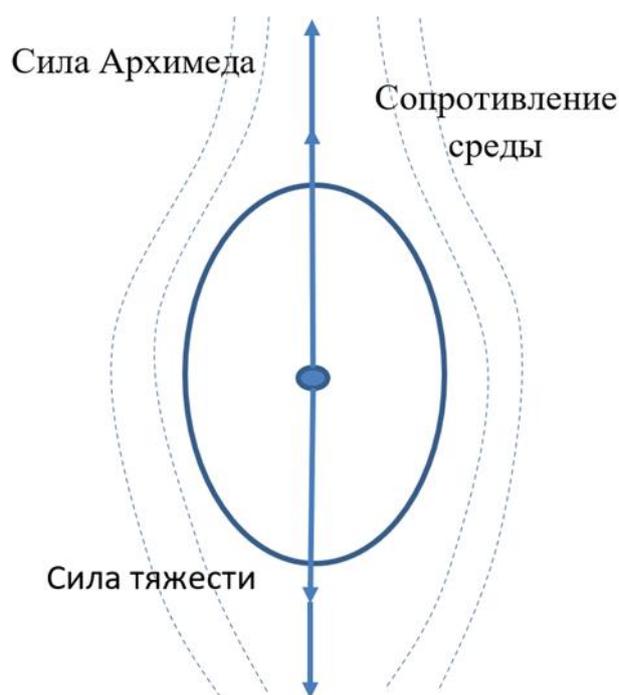


Рисунок 2.4 – Силы, действующие на погружаемую капсулу

Рассматривая тело произвольной формы, находящееся в жидкости, следует отметить, что горизонтальные компоненты гидростатического давления, действующие с противоположных сторон, взаимно компенсируются вследствие симметрии проекций поверхностей на соответствующие вертикальные плоскости. Вертикальные же составляющие формируют результирующую силу, которая соответствует закону Архимеда: на тело действует направленная вверх сила, равная

весу вытесненной телом жидкости. Состояние равновесия тела в жидкости зависит от соотношения веса тела и выталкивающей силы. При превышении веса над выталкивающей силой тело погружается и ускоряется до достижения терминальной скорости, когда силы тяжести, плавучести и гидродинамического сопротивления уравниваются.

Рассматривая капсулу в изолированной системе отсчета, получим следующий вид уравнения движения капсулы, погружающейся в жидкость (2.21):

$$m \frac{dv}{dt} = (\rho_t - \rho_f) \cdot V_t g - \frac{1}{2} \rho_f v^2 C_d S, \quad (2.21)$$

где m – масса капсулы, кг,

v – скорость погружения, м/с,

t – время, с,

ρ_t – плотность тела (капсулы), кг/м³,

ρ_f – плотность жидкости (воды), кг/м³,

V_t – объем капсулы, м³,

g – ускорение свободного падения, м/с²,

C_d – коэффициент сопротивления среды,

S – площадь поперечного сечения капсулы, м².

Гидродинамическое сопротивление при движении тела в жидкости определяется законом квадратичной зависимости от скорости, площади поперечного сечения и коэффициента лобового сопротивления, зависящего от геометрической формы и условий обтекания тела. Согласно гидродинамическим исследованиям, различные формы капсул обладают существенно различающимися коэффициентами сопротивления (рисунок 2.5). Например, сферическая форма характеризуется коэффициентом сопротивления $C_d \approx 0,47$, цилиндрическая (продольная ориентация) может иметь $C_d \approx 0,1-0,4$, цилиндрическая (поперечная ориентация) – до 1,0, а максимально обтекаемая каплевидная форма демонстрирует минимальный коэффициент $C_d \approx 0,04-0,06$.

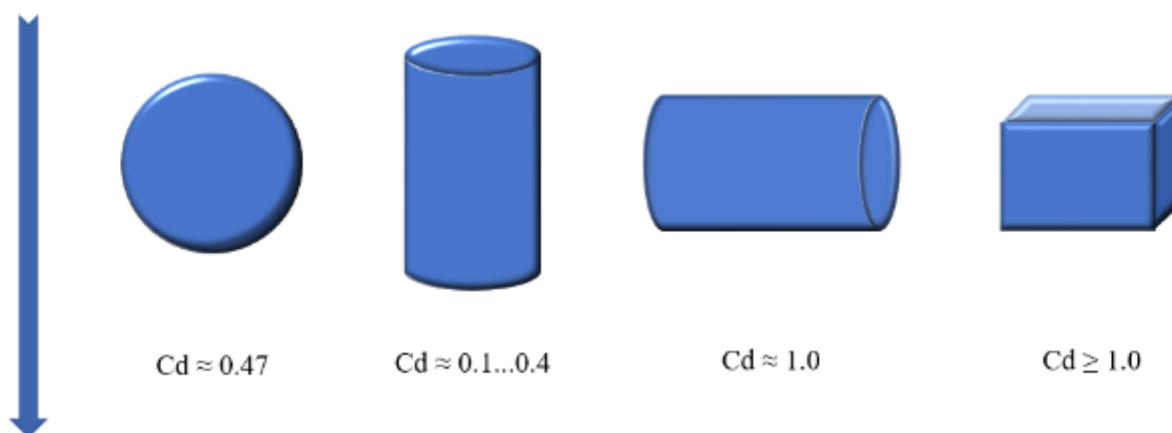


Рисунок 2.5 – Примерные коэффициенты сопротивления среды для различных геометрических форм

Известно, что коэффициент сопротивления зависит от множества показателей, в частности геометрических, и определяется только эмперически. Тогда можно утверждать, что коэффициент сопротивления – это функция от геометрических и динамических показателей капсулы (2.22):

$$C_d = f\left(\frac{l}{d}, Re, \text{форма}\right), \quad (2.22)$$

где l/d – соотношение длины и диаметра капсулы (удлиненность капсулы),

Re – число Рейнольдса (характеризует режим движения жидкости вокруг тела),

форма – геометрия капсулы (сферическая, цилиндрическая, обтекаемая и т.п.).

Помимо гидродинамических аспектов, при выборе оптимальной формы капсулы следует учитывать такие факторы, как устойчивость к внешнему гидростатическому давлению, стабильность ориентации при движении, технологичность изготовления, а также возможность рационального размещения внутреннего оборудования. Так, сферическая форма отличается наилучшими характеристиками прочности при равномерном внешнем давлении, однако обладает умеренным гидродинамическим сопротивлением и ограниченным внутренним объемом. Цилиндрическая форма при продольной ориентации предоставляет компромисс между низким сопротивлением, высокой прочностью и простотой внутренней компоновки. Кубическая или прямоугольная формы, хотя и просты в изготовлении, вызывают значительное гидродинамическое сопротивление и нестабильность ориентации.

С точки зрения механики сплошных сред и теории оболочек, цилиндрические конструкции, ориентированные продольно к направлению движения, демонстрируют высокую устойчивость к равномерному гидростатическому давлению, обусловленную симметрией распределения напряжений. Это соответствует положениям теории прочности тонкостенных оболочек, где цилиндрические оболочки устойчиво выдерживают значительные внешние нагрузки при минимальной массе конструкции, что подтверждается классическими работами Тимошенко, Флюгге и других авторов в области сопротивления материалов и теории упругости.

С точки зрения внутренней компоновки оборудования, цилиндрическая форма предоставляет оптимальные условия для эффективного размещения приборов и систем, обеспечивая при этом удобство технологического обслуживания и возможность рационального использования внутреннего объема капсулы.

Таким образом, теоретический анализ свидетельствует о том, что цилиндрическая форма капсулы с продольной ориентацией в потоке жидкости является наиболее рациональной, так как сочетает приемлемое гидродинамическое сопротивление, высокую конструкционную прочность и удобство внутренней компоновки оборудования. Вместе с тем, для точного определения оптимальных параметров геометрии капсулы (соотношение длины и диаметра, форма торцевых поверхностей и других конструктивных элементов) необходимо проведение экспериментальных исследований и натурных испытаний. Только эксперимент позволит получить конкретные численные значения, подтверждающие теоретические выводы и учитывающие реальные условия эксплуатации.

2.4 Определение рациональных геометрических размеров

Используя в качестве рассматриваемой модели промежуточную капсулу цилиндрической формы с торцевыми полусферами и определим геометрические параметры капсулы подобной формы. Типовая промежуточная капсула с подобной формой изображена на рисунке 2.6.

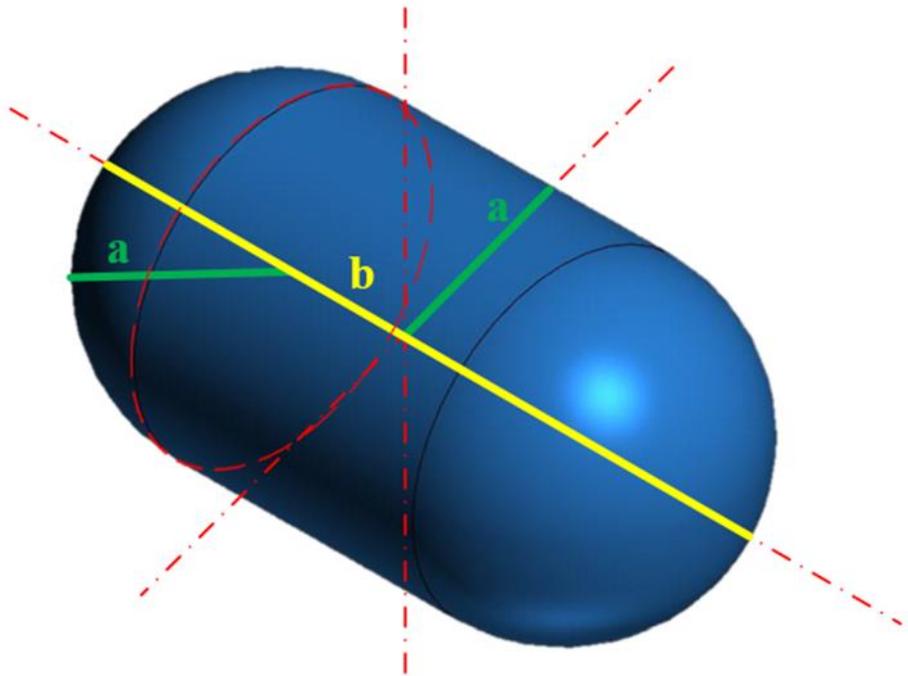


Рисунок 2.6 – Определение осей цилиндрической капсулы с торцевыми полуосями

где, a – радиус цилиндра и торцевых полусфер; b – ось цилиндра

Так как цилиндр обладает осью и радиусом, то можно утверждать следующее (2.23):

$$V = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \left(b + \frac{2}{3} \cdot a^2 \right), \text{ м}^3, \quad (2.23)$$

где a – радиус сечения цилиндра капсулы, м,

b – длина оси, м.

Зная толщину стенки капсулы, определим объем, заполненный воздухом (2.24):

$$V = 2 \cdot \pi \cdot (a - l) \cdot \left(b - 2l + \frac{2}{3} \cdot (a - l)^2 \right), \text{ м}^3, \quad (2.24)$$

где l – толщина стенки капсулы, м.

Таким образом, площадь поперечного сечения определяется как (2.25):

$$S = \pi \cdot a^2, \quad (2.25)$$

Зададим некий коэффициент формы, который будет отражать вытянутость капсулы (2.26):

$$K_f = \frac{a}{b}, \quad (2.26)$$

Соотношение радиуса цилиндра к оси позволит исследовать капсулу при различных формах, что в свою очередь позволит определить рациональную форму и длину. Однако необходимо учитывать, что, изменение радиуса, уменьшает сечение капсулы, что напрямую влияет на значение коэффициент лобового сопротивления. Также не имеет смысла рассматривать форму капсулы со значением $K_f = 1,0$, так как при таком значении капсула принимает форму сферы.

Главными характеристиками являются производительность и энергозатраты, а, следовательно, для определения рациональных параметров, необходимо соблюдение баланса между этими характеристиками. Таким образом, принимая во внимания характеристики перспективных месторождений уникальных твердых полезных ископаемых, а также теоретические значения переменных получим следующие графики производительности и энергозатрат, в зависимости от соотношения оси и радиуса цилиндра (рисунок 2.7).

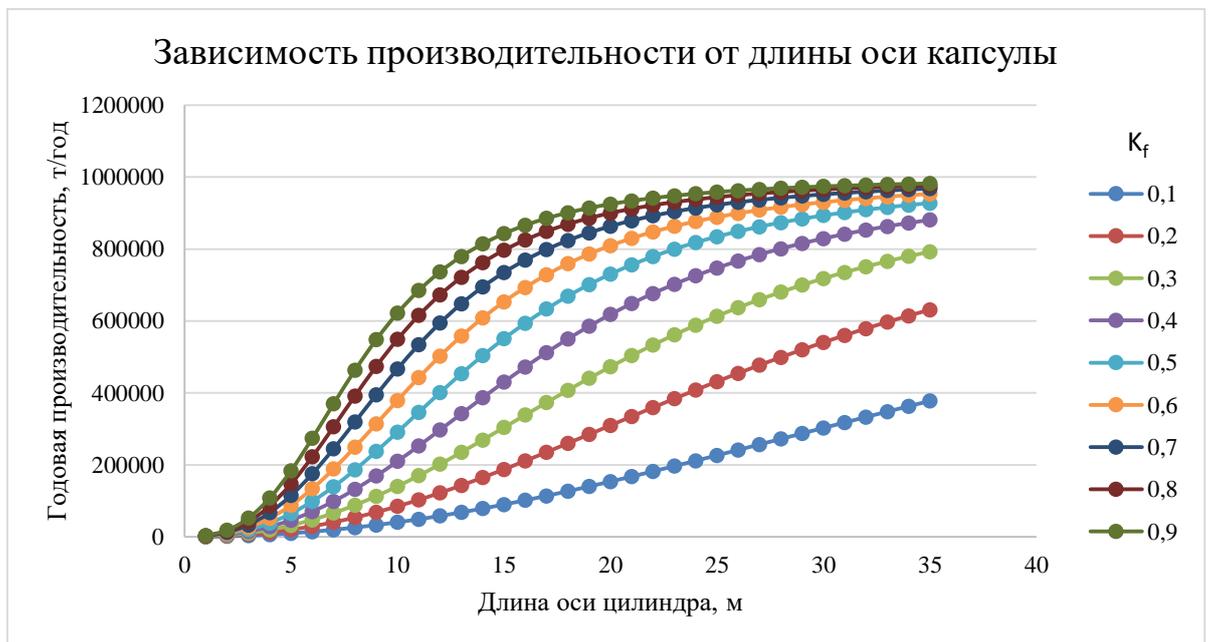


Рисунок 2.7 – Зависимость производительности от длины оси капсулы [составлено авторами]

С увеличением длины оси цилиндра происходит закономерный рост производительности системы, так как увеличивается внутренний полезный объем, что позволяет за время цикла поднимать большее количество полезного

ископаемого. Однако для каждого значения коэффициента формы рост производительности, идет не одинаково, по причине разного градиента увеличения объема при изменении длины оси. Со временем рост замедляется, достигая своего асимптотического значения. Это происходит из-за значительного увеличения времени заполнения капсулы, из-за чего затрачиваемое время на остальные операции становится несущественным. Исследуем предел функции, при котором значение длины оси стремится к бесконечности (2.27):

$$\lim_{b \rightarrow \infty} A = \frac{V_B \cdot \rho_{\text{ПИ}} \cdot X \cdot Z}{T \cdot 1000}, \text{ т/час,} \quad (2.27)$$

Функция является определённой, а значит предельное значение производительности составляет примерно $A \approx 125,84$ т/час, что в год составляет $A_{\text{год}} \approx 996718$ т/год. Причем можно заметить, что в таком случае часовая производительность будет соответствовать массовому расходу. А значит, что при бесконечном увеличении длины капсулы, система становится поточной. Но в реальных условиях, есть ограничения, не позволяющие увеличить размеры капсулы до сверх больших значений. Одним из таких являются энергозатраты.

Исследуя график на (рисунок 2.8), можно сделать вывод что при увеличении длины капсулы рост энергозатрат имеет экспоненциальный характер.

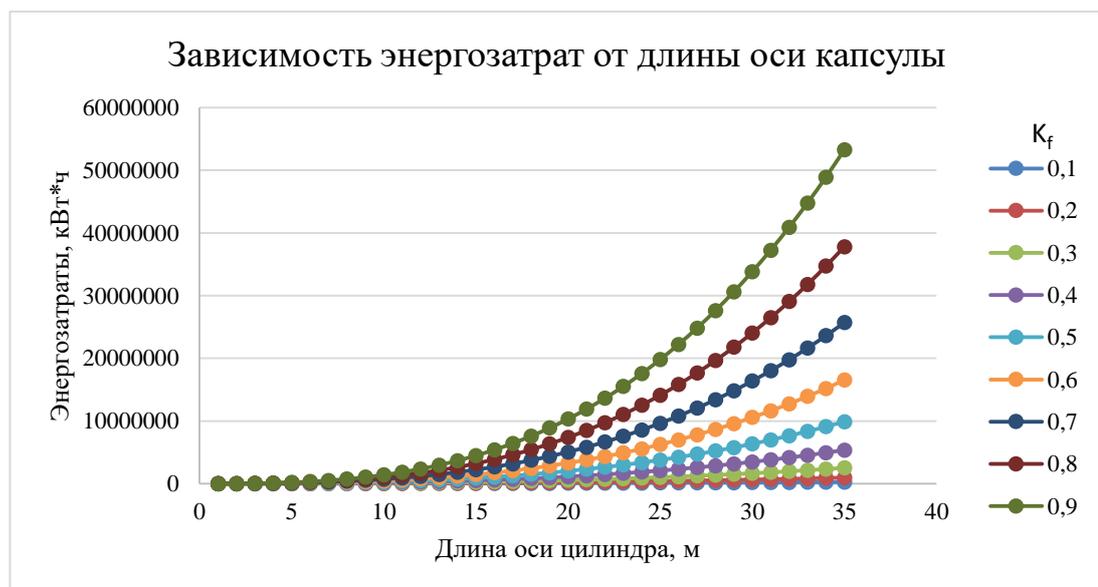


Рисунок 2.8 – Зависимость энергозатрат от длины оси капсулы [составлено авторами]

Это обусловлено тем, что при увеличении объема капсулы растет также и ее масса. Масса напрямую влияет на потребное тяговое усилие лебедки. Значит

необходимо найти такие значения длины, радиуса капсулы и коэффициента K_f , чтобы определить рациональные технологические требования к промежуточной капсуле.

2.5 Расчет удельной производительности циклично-поточного способа подъема

Рассмотрим параметры капсулы, с точки зрения энергетической эффективности и сравним значения циклично-поточного способа с остальными рассмотренными ранее технологиями. Отдельно стоит отметить, что сравнение необходимо проводить в приблизительно равных условиях залегания месторождения, одинаковым коэффициентом содержания ПИ в трубопроводе и одинаковой производительностью добычного условия. Эти допущения приняты для объективного сравнения различных технологий (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Расчет производительности и потребляемой энергии циклично-поточного способа подъема

Система	Энергозатраты, кВт·ч	Производительность, т/час
Циклично-поточное	$E = n \cdot \frac{S_k \cdot v_{под}}{\mu_n}$	$A = \frac{V_B \cdot \rho_{ПИ} \cdot X \cdot Z}{T \cdot 1000}$

Определим значение энергетической эффективности, используя ранее исследованные графики (рисунок 2.9).

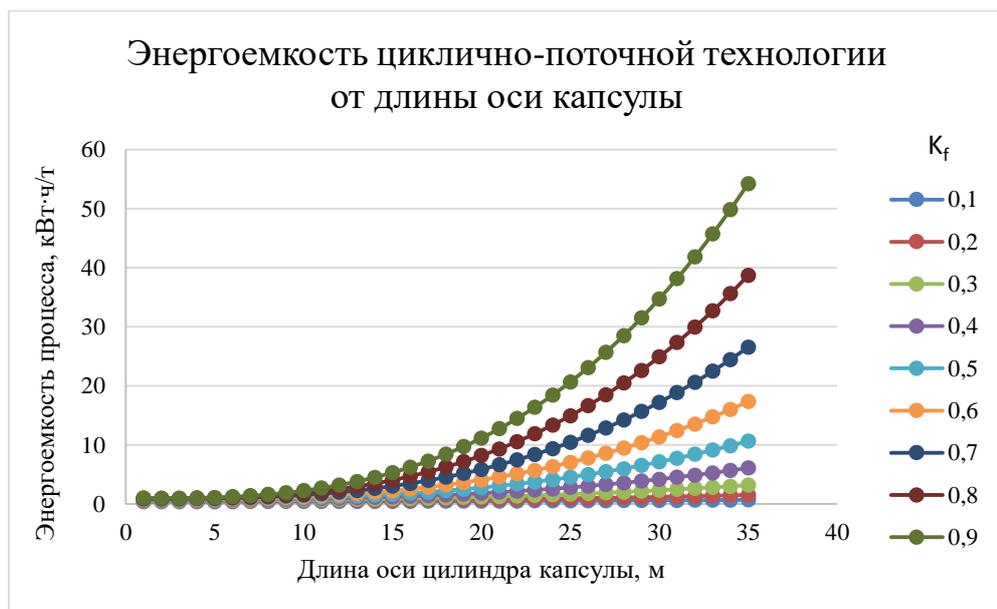


Рисунок 2.9 – Зависимость энергоемкости процесса от длины оси капсулы

Исследуя график на рисунке 2.9, можно заметить, что при определении энергоемкости процесса график имеет похожий экспоненциальный характер, как и энергоемкость. Это обусловлено приведением значения к 1 тонны добываемого ПИ, в связи с чем значение производительности является постоянной величиной.

Принимая во внимание рисунок 2.10, а также глубину залегания месторождения ЖМК, определим значения длины оси цилиндра и коэффициента K_f для значения поточной технологии при глубине 3500 метров, а именно 10 кВт·ч/т. Тогда получим следующий график:

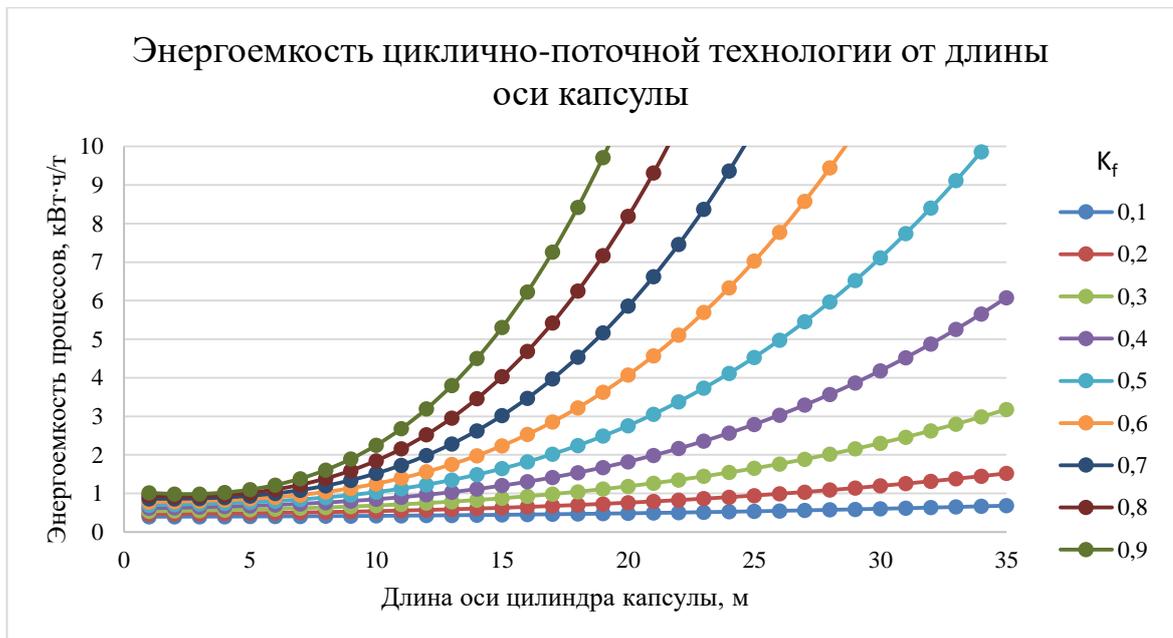


Рисунок 2.10 – Зависимость энергоемкости от длины оси капсулы (максимальное значение ограничено 10 кВт*ч)

Исследуя рисунок 2.10, можно увидеть, что для длины оси в диапазоне от 0 до 35 метров, существует диапазон значения коэффициента K_f , при котором достигается значение в 10 кВт·ч/т. Причем необходимо помнить, что чем больше K_f , тем быстрее достигается значение максимальной производительности. Тогда ограничимся значением K_f от 0,5 до 0,9 и найдем соответствующие значения производительности при энергозатратах в 10 кВт·ч/т:

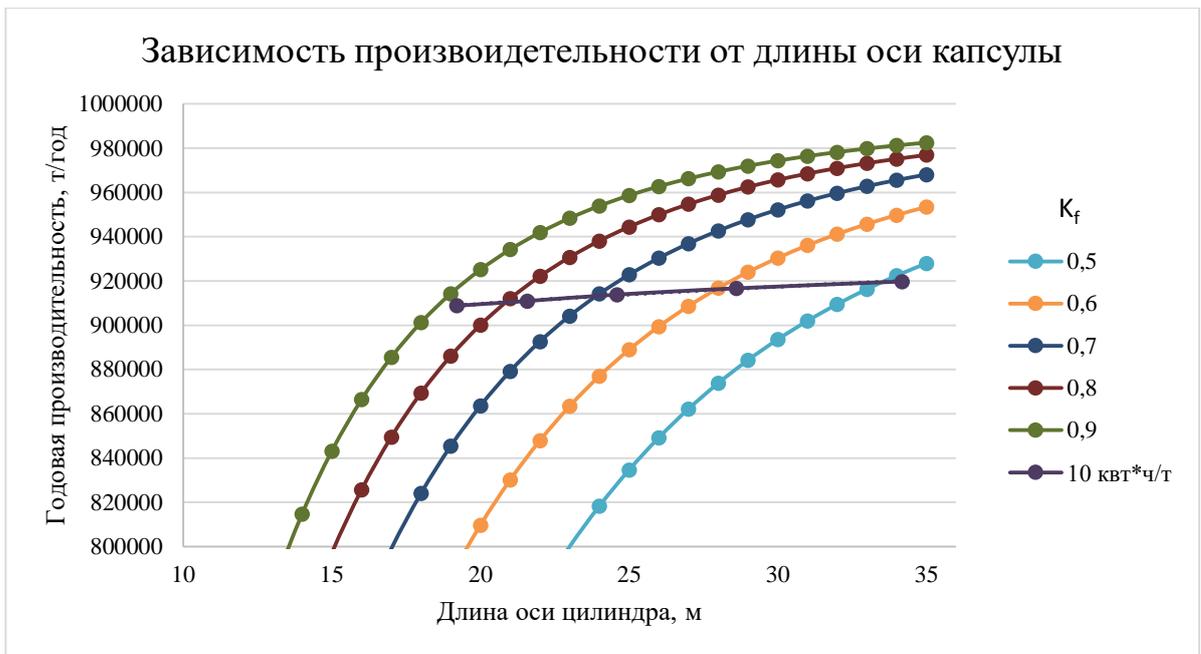


Рисунок 2.11 – Зависимость производительности от длины оси капсулы (максимальное значение ограничено 10 кВт·ч)

Анализируя графики на рисунке 2.11, можно сделать вывод, изменение производительности происходит в диапазоне от 910783 до 920034 т/год, что составляет от 91,3 % до 92,6 % от максимально возможного значения производительности. Тогда, подставив значения в математическую модель определения параметров промежуточной капсулы, запишем все исходные данные в сводную таблицу 2.2:

Таблица 2.2 – Принятые значения показателей для расчета энергетической эффективности технологий подъема

Показатель	Системы подъема				
	Циклическая	Поточная (насос)	Поточная (эрифт)	Поточная (двухстадийная)	Циклично-поточная
S_k , кН	300 – 650	-	-	-	15618
$v_{\text{под}}$, м/с	0,04 – 4,5	-	-	-	1,88
μ	0,8	0,7	0,3	0,7	0,75
n	3	1	2	3	2
$\rho_{\text{см}}$, кг/м ³	-	1066	960	1066	1066
H , м	-	498.5	411.3	1852	1413
Q , м ³ /с	-	0,39	0,39	0,39	0,39
$v_{\text{см}}$, м/с	-	2.22	2.2	2.22	-
$\omega_{\text{тр}}$, м ²	-	0.196	0.196	0.196	-

Продолжение таблицы 2.2

Показатель	Системы подъема				
	Цикличная	Поточная (насос)	Поточная (эрлифт)	Поточная (двухстадийная)	Циклично-поточная
$V, \text{ м}^3$	-	-	-	-	3000
$V_k, \text{ м}^3$	42	-	-	-	-
$\rho_T, \text{ кг/м}^3$	-	-	-	-	1234
$\rho, \text{ кг/м}^3$	-	-	-	-	1030
$C_{об}$	0,6	0,03	0,03	0,03	0,03
$\rho_{ш}, \text{ т/м}^3$	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
C	-	-	-	-	0.36
$v_k, \text{ м/с}$	-	-	-	-	1.82
$T, \text{ с}$	3225	-	-	-	6765 – 10216

Таким образом получим примерно равные условия исследуемых способов транспортирования ЖМК с морского дна. Однако стоит отметить, что в зависимости от принятых технологических решений данные значения могут варьироваться. Так, например, если установить средство предварительной рудо-подготовки на морском дне, то сможем обеспечить одинаковый размер твердой фракции, что существенно повысит производительность поточной и эрлифтной системы, но и увеличит общие энергозатраты. Опуская данные возможности, получим следующий график (рисунок 2.12):

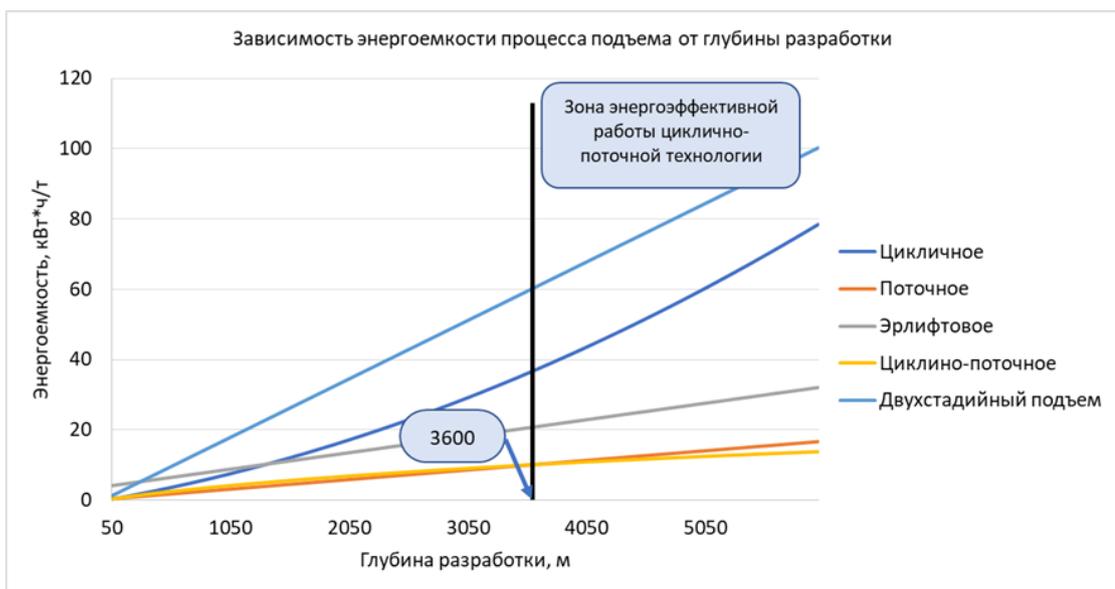


Рисунок 2.12 – Энергетическая эффективность глубоководной добычи твердых полезных ископаемых

Ввиду широкого распространения ЖМК по морскому дну и, как следствие, разнообразных глубин залегания следует определить границы применимости технологий. В рамках реализации глубоководного комплекса необходимо учитывать не только финансовую составляющую, но также и энергетическую. На рисунке 2.12 видно, что при увеличении глубины разработки месторождения энергоемкость процесса подъема увеличивается во всех случаях [24].

Наиболее энергозатратным способом является двухстадийный гидроподъем, однако он имеет перспективы применения в условиях шельфовой добычи. Наиболее простым с технической точки зрения и достаточно эффективным до глубин 1200 метров является циклический способ, также он получил широкое распространение при ведении геологоразведочных работ. Наиболее перспективными являются эрлифтная система, насосная система гидроподъема и циклично-поточный способ [24].

При глубинах акватории более 3600 метров наиболее энергоэффективной является циклично-поточная технология, так как она имеет наименьшее значение энергоемкости для указанной глубины – 10,8 кВт·ч/т [24].

Эта особенность обусловлена малой зависимостью технологии от глубины разработки, так как с ее ростом необходимая высота погружения капсулы растет незначительно. В этой связи ограничивающим фактором циклично-поточного способа подъема является производительность промежуточной капсулы. Следовательно, при определении оптимальных параметров капсулы можно достичь наибольшей энергоэффективности [24].

Данное сравнение сделано укрупненно, без учета особенностей тех или иных способов транспортирования, с целью достижения примерно равных условий эксплуатации. Сравнение технологий производилось лишь с учетом энергозатрат, однако при включении в сравнение экономических, технических или функциональных особенностей результат может поменяться.

Таким образом, наиболее рациональные значения длины оси цилиндрической формы капсулы, находятся в диапазоне от 19 до 34 м, со значением коэффициента K_f от 0,9 до 0,5 соответственно, с производительностью

≈920000 т/год, причем, чем меньше соотношение осей, а следовательно, и вытянутость капсулы, тем большей производительности можно достичь. Однако необходимо помнить об ограничении полезного объема капсулы и ее массы, а следовательно ее плотности, для определения критериев выбора промежуточной капсулы.

2.6 Выводы по главе 2

1) Циклично-поточный способ подъема железомарганцевых конкреций представляет собой эффективное решение для глубоководной добычи. Использование гидростатического давления для заполнения промежуточной капсулы и лебедочной системы для её подъёма позволяет значительно сократить энергозатраты и повысить надёжность технологии. Данный подход оптимален для освоения глубоководных ресурсов, поскольку сочетает энергоэффективность с минимальным воздействием на окружающую среду. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на оптимизации параметров системы и разработке адаптивных решений, учитывающих изменяющиеся условия морской среды.

2) Форма промежуточной капсулы оказывает существенное влияние на её скорость погружения за счёт изменения гидродинамического сопротивления. Каплевидная форма является наиболее эффективной для глубоководных операций благодаря минимальному значению коэффициента лобового сопротивления. Однако выбор формы должен учитывать как гидродинамические характеристики, так и конструктивные особенности, специфические для задач проекта. Дальнейшие исследования в этой области направлены на создание адаптивных и многофункциональных конструкций, сочетающих в себе преимущества различных подходов для повышения эффективности глубоководных технологий.

3) По удельной производительности циклично-поточный способ наиболее рационален для использования при разработке твердых полезных ископаемых на глубинах, превышающих 3600 м. Однако необходимо учитывать ограничения, которые возникают при проведении прочностного расчета и при расчете коэффициента гидродинамического сопротивления. В настоящий момент не существует действенных методик для определения коэффициента общего

сопротивления, поэтому определяться он должен эмпирически. Проведение эксперимента сопряжено с некоторыми факторами, в частности, с учетом изменения плотности воды при погружении, температуры, вязкости и прочих параметров, не позволяющих точно определить значение сопротивления.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРУЖЕНИЯ КАПСУЛЫ

3.1 Сопротивление тел, обтекаемых вязкой жидкостью

При погружении промежуточной капсулы в жидкость возникают сложные гидродинамические явления, среди которых особое значение имеет сила сопротивления среды. Данная сила является результатом взаимодействия поверхности движущегося тела с окружающей жидкостью и формируется из нескольких компонентов, прежде всего, из сил давления и сил вязкого трения.

Сила давления возникает вследствие изменения распределения давления на передней и задней частях погружаемого тела. При движении тела в жидкости передняя поверхность испытывает повышенное давление, в то время как за телом формируется зона пониженного давления (гидродинамический след). Давление в следе за телом ниже, чем во внешнем невозмущённом потоке, что связано с наличием вихревых образований, которые формируются при отрыве пограничного слоя. Этот перепад давления является основной причиной лобового сопротивления тела. Величина данного сопротивления зависит от геометрических характеристик и ориентации тела относительно потока.

Сила трения, в свою очередь, обусловлена вязкостью жидкости и трением частиц жидкости о поверхность тела. Однако, для капсул относительно крупных размеров, рассмотренных в настоящем исследовании, влияние шероховатости поверхности незначительно, поскольку толщины ламинарного или турбулентного пограничного слоя малы по сравнению с характерными размерами тела. Это позволяет сделать вывод о несущественности влияния шероховатости на коэффициент сопротивления и сосредоточиться на изучении лобового сопротивления, которое определяется, главным образом, формой тела.

Все тела делят на хорошо обтекаемые и плохо обтекаемые. Тела, обтекаемые без отрыва пограничного слоя, называют хорошо обтекаемыми, а с отрывом – плохо обтекаемыми. Обтекаемость тел зависит от тех же факторов, что и аэродинамические коэффициенты и может характеризоваться отношением силы сопротивления давления к силе сопротивления трения. Одно и то же тело при

различной ориентации в потоке и при различных режимах течения может быть хорошо и плохо обтекаемым. Плохо обтекаемые тела всегда обтекаются с отрывом. Рассмотрим зависимость коэффициента C_x шара от числа Рейнольдса (рисунок 3.1):

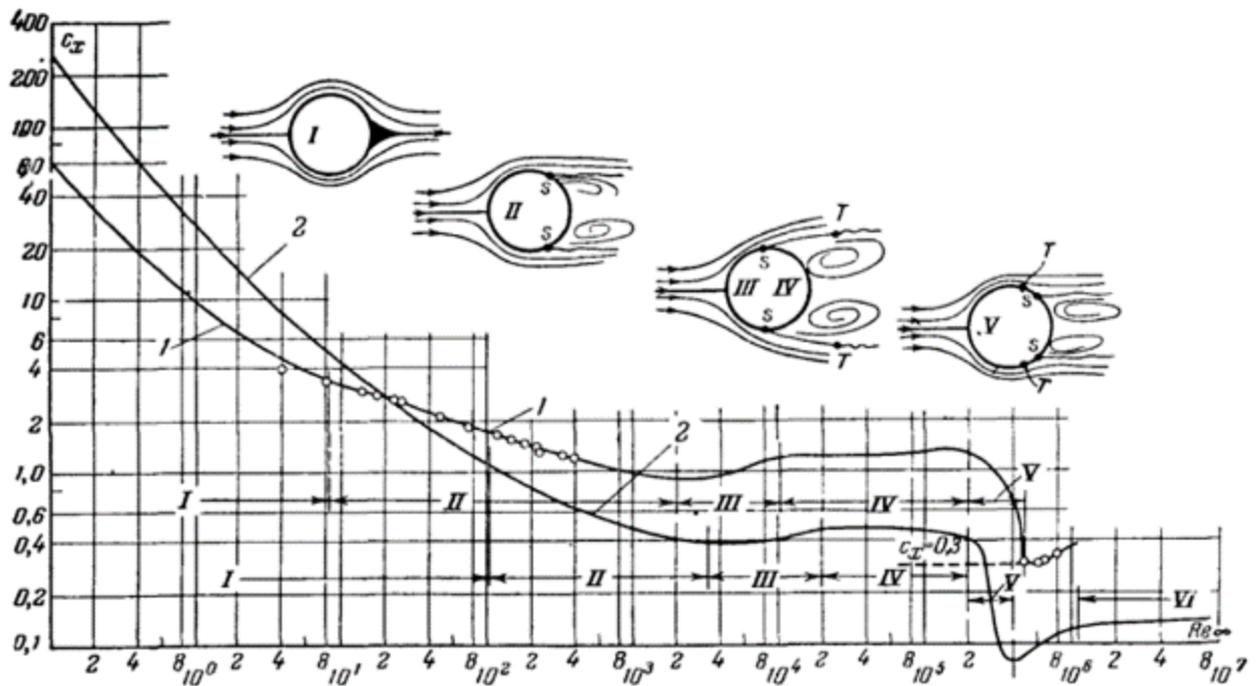


Рисунок 3.1 – Схемы обтекания и коэффициенты сопротивления шара и цилиндра в зависимости от числа Рейнольдса: 1 - цилиндр; 2 – шар

Коэффициент гидродинамического сопротивления изменяется в зависимости от режима течения, характеризуемого числом Рейнольдса. При погружении цилиндрического тела в воду можно выделить пять характерных зон изменения коэффициента сопротивления с ростом числа Рейнольдса. В первой зоне, при числах Рейнольдса $Re < 100$, наблюдается ламинарное обтекание тела с преобладанием сил вязкого трения. В этой области коэффициент сопротивления достаточно высокий и снижается с ростом числа Рейнольдса, поскольку ламинарный пограничный слой имеет небольшую толщину и обтекание тела происходит практически без отрыва.

Во второй зоне, в диапазоне Re от 100 до 3×10^3 , поток начинает формировать неустойчивые вихревые структуры, располагающиеся за телом. В результате увеличивается сопротивление давления, однако это не приводит к значительному изменению коэффициента сопротивления, который медленно снижается.

В третьей зоне, при числах Рейнольдса от (3×10^3 до 2×10^4), ламинарный

пограничный слой начинает отрываться от поверхности тела. Вихреобразование за телом усиливается, пограничный слой становится нестабильным и турбулизируется в кормовой зоне. В данной области наблюдается некоторое повышение коэффициента сопротивления, обусловленное активизацией вихревых структур.

Четвёртая зона, лежащая в диапазоне чисел Рейнольдса от 2×10^4 до 2×10^5 , характеризуется локальной автомодельностью течения. Коэффициент сопротивления стабилизируется и практически не меняется, поскольку точка отрыва пограничного слоя перестаёт смещаться и стабилизируется в определённой точке на поверхности тела. Это обуславливает постоянство гидродинамического следа и, соответственно, стабильность коэффициента сопротивления.

Наиболее значительные изменения происходят в пятой зоне, в диапазоне чисел Рейнольдса от 2×10^5 до 4×10^5 . Здесь коэффициент сопротивления резко уменьшается в результате так называемого «кризиса сопротивления». Это явление вызвано тем, что ламинарный пограничный слой турбулизируется до момента отрыва, благодаря чему точка отрыва перемещается в кормовую часть тела. Результатом такого сдвига является существенное снижение размеров вихревого следа и, как следствие, уменьшение силы сопротивления примерно в 3-5 раз.

После прохождения указанного кризисного участка, при $Re > 4 \times 10^5$, коэффициент сопротивления слегка увеличивается и стабилизируется на постоянном уровне. В этом режиме обтекания положение точки отрыва стабильно, а поток в значительной степени турбулентный.

При погружении цилиндрического тела в воду, в зависимости от его размеров и характеристик жидкости (плотность, вязкость, температура), этим пяти зонам чисел Рейнольдса соответствуют ориентировочные диапазоны скоростей: первая зона – скорость менее 0,1 м/с; вторая зона – скорости примерно от 0,1 до 0,5 м/с; третья зона – от 0,5 до 2 м/с; четвёртая зона – от 2 до 5 м/с; и пятая зона – скорости выше 2-5 м/с. Точные численные значения могут варьироваться в зависимости от конкретных условий эксперимента и точных размеров цилиндрического тела.

3.2 Существующие эксперименты определения сопротивления пограничного слоя

Экспериментальный метод Бетца.

Экспериментальный метод Бетца является одним из наиболее распространенных подходов для определения гидродинамического сопротивления при движении тел в жидкости, широко применяемым в гидродинамических и аэродинамических исследованиях. Данный метод предложен немецким учёным Альбертом Бетцем (Albert Betz), который изначально использовал его для определения коэффициента профильного сопротивления в аэродинамике, однако впоследствии он получил широкое распространение и в гидродинамике.

Экспериментальный метод Бетца базируется на концепции выделения контрольной поверхности (контрольного объёма) вокруг исследуемого тела, которая включает область течения перед телом (сечение I) и область следа за телом (сечение II). Во входном сечении перед телом, в предположении отсутствия сопротивления, полное давление жидкости (или газа) принимается за g_{∞} . В заднем сечении за телом, в результате воздействия вязких сил и образования гидродинамического следа, полное давление g_2 уменьшается и становится меньше исходного значения, то есть $g_2 < g_{\infty}$. Важным моментом является предположение о том, что боковые стенки контрольного объёма расположены достаточно далеко от тела, чтобы считать течение на этих границах невозмущённым.

Согласно методу Бетца, интегралы, получаемые при проведении измерений, преобразуются так, чтобы их пределы интегрирования не выходили за пределы профиля скорости в гидродинамическом следе. Основной принцип расчёта базируется на разнице полного давления между начальным и выходным сечениями потока, а также статического давления, измеряемого за телом (p_2). В конечном виде, после соответствующих теоретических преобразований, коэффициент гидродинамического сопротивления вычисляется по следующей формуле (3.1):

$$C = \int \frac{g_{\infty} - g_2}{g_{\infty}} d\left(\frac{y}{l}\right) + \int \left(\sqrt{\frac{g_{\infty} - p_2}{g_{\infty}}} - \sqrt{\frac{g_2 - p_2}{g_{\infty}}} \right) \left(\sqrt{\frac{g_{\infty} - p_2}{g_{\infty}}} - \sqrt{\frac{g_2 - p_2}{g_{\infty}}} - 2 \right) d\left(\frac{y}{l}\right), \quad (3.1)$$

где g_{∞} – полное давление на входе (невозмущённое), Па,

g_2 – полное давление в следе, Па,

p_2 – статическое давление в сечении II, Па,

y/l – безразмерная координата, характеризующая положение измеряемой точки.

Суть метода заключается в измерении полного и статического давлений за объектом, что позволяет определить снижение энергии потока, а следовательно, и величину силы сопротивления среды. Метод особенно эффективен, если задача состоит в определении сопротивления объектов, не подвергающихся значительным возмущениям потока по боковым границам.

Достоинства метода Бетца:

Простота и удобство применения. Основным преимуществом является простота выполнения и обработки экспериментов: измеряются давления в контрольном сечении за телом, затем происходит расчёт коэффициента сопротивления по прямым формулам без необходимости сложных дополнительных экспериментов и обработки данных.

Возможность применения для различных типов потоков жидкости и газа, при условии их невозмущенности вдали от тела, благодаря универсальности используемых физических принципов и отсутствию строгих ограничений на вид жидкости.

Метод находит широкое применение для валидации результатов численного моделирования в гидро- и аэродинамике, являясь классическим инструментом экспериментальной гидро- и аэродинамики.

Недостатки экспериментального метода Бетца:

Несмотря на эффективность, метод обладает рядом существенных недостатков и ограничений:

Игнорирование геометрии и формы тела. Формула, предлагаемая методом Бетца, не учитывает явно геометрические особенности исследуемого объекта. Коэффициент сопротивления является интегральной величиной, зависящей от потери полного давления и не раскрывающей причин, обусловленных деталями геометрии.

Отсутствие зависимости от температуры и плотности среды. Указанная

методика не принимает во внимание изменчивость физических свойств жидкости (например, плотность и вязкость при разных температурах и давлениях), которые непосредственно влияют на значение силы сопротивления и, соответственно, коэффициента сопротивления.

Отсутствие учёта числа Рейнольдса. Метод Бетца не позволяет напрямую учитывать характер изменения режима течения (ламинарный или турбулентный), связанный с числом Рейнольдса. Известно, что режим течения в пограничном слое существенно влияет на коэффициент сопротивления. Особенно это важно при изучении объектов, форма которых провоцирует отрыв потока и развитие турбулентности.

Температура и вязкость среды не учитываются, что ограничивает универсальность метода для жидкостей с изменяющимися физическими параметрами. Для высокоточных исследований гидродинамических явлений это является существенным ограничением.

Экспериментальный метод Джонса

Экспериментальный метод Джонса представляет собой модификацию более раннего метода Бетца и также предназначен для определения гидродинамического сопротивления тел, движущихся в жидкости. Этот метод, предложенный учёным Б.М. Джонсом, применяется преимущественно в гидро- и аэродинамических исследованиях для расчета коэффициента гидродинамического сопротивления среды, возникающего при движении тела или его обтекании жидкостью (или газом).

Основным отличием метода Джонса от метода Бетца является место проведения измерений: если у Бетца измерения производятся на некотором удалении позади тела (в гидродинамическом следе), то Джонс предложил проводить измерения значительно ближе к исследуемому телу (в непосредственной близости, в сечении II). Благодаря этому статическое давление в этом сечении оказывается существенно отличным от статического давления невозмущённого потока, что обеспечивает более явную и чёткую картину распределения давлений за телом.

В основе метода Джонса лежит уравнение неразрывности струйки жидкости, которое выражается следующим образом (3.2):

$$\rho \cdot u_1 \cdot dy_1 = \rho \cdot u_2 \cdot dy_2, \quad (3.2)$$

где u_1 и u_2 – скорости потока в сечениях I и II соответственно, м/с,

ρ – плотность жидкости, кг/м³,

dy_1 – элемент поперечного размера струйки жидкости.

В результате выполнения необходимых теоретических преобразований (подробно изложенных в работе Шлихтинга «Теория пограничного слоя») можно получить выражение для определения коэффициента гидродинамического сопротивления среды по Джонсу в следующем виде (3.3):

$$C = 2 \int \sqrt{\frac{g_2 - p_2}{g_\infty}} \left(1 - \sqrt{\frac{g_2 - p_\infty}{g_\infty}} \right) d\left(\frac{y}{l}\right), \quad (3.3)$$

где g_∞ – полное давление в невозмущенном потоке на входе (в сечении I), Па,

g_2 – полное давление в контрольном сечении непосредственно за телом (в сечении II), Па,

p_2 – статическое давление в сечении II, Па,

p_∞ – статическое давление в невозмущенном потоке (далеко от тела), Па.

Метод Джонса предполагает выполнение следующих условий:

- Поток жидкости между входным (I) и выходным (II) сечениями течения не испытывает потерь механической энергии, то есть полное давление вдоль рассматриваемой струйки жидкости остаётся неизменным.
- Боковые границы контрольного объёма располагаются так, чтобы течение в этих зонах оставалось невозмущённым, следовательно, потери энергии через боковые границы не учитываются.

В эксперименте измеряются следующие параметры: полное давление g_2 за исследуемым объектом и статическое давление p_2 .

Достоинства метода Джонса

Метод Джонса обладает следующими преимуществами по сравнению с другими методами измерения гидродинамического сопротивления:

Повышенная чувствительность к изменениям давления. За счёт более

близкого расположения измерительного сечения непосредственно к исследуемому объекту изменения полного и статического давлений более выражены и легче фиксируются измерительными приборами.

Более компактная экспериментальная установка: В силу того, что измерения производятся близко к исследуемому объекту, экспериментальные установки могут быть менее громоздкими и более компактными, что облегчает проведение исследований и снижает стоимость оборудования и подготовки эксперимента.

Уменьшение влияния погрешностей измерений: Близость измерений к телу позволяет минимизировать влияние внешних факторов, таких как вихри и нестабильность гидродинамического следа, что обеспечивает более стабильные результаты.

Недостатки метода Джонса

Однако метод Джонса также обладает некоторыми принципиальными недостатками и ограничениями:

Отсутствие учёта формы тела. Аналогично методу Бетца, метод Джонса не принимает во внимание явную зависимость коэффициента сопротивления от формы исследуемого объекта. Вследствие этого получаемые результаты носят интегральный характер и не позволяют детально оценить влияние формы и конструкции тела на сопротивление.

Не учитывается температура и плотность среды: В формуле не отражены изменения физических характеристик жидкости, таких как вязкость и плотность, которые могут существенно меняться с изменением температуры и оказывать сильное влияние на результаты экспериментов. Этот фактор значительно ограничивает точность и универсальность применения метода.

Отсутствие зависимости от числа Рейнольдса: Метод Джонса, аналогично методу Бетца, не предусматривает прямого учёта числа Рейнольдса, что не позволяет явно учитывать режим течения (ламинарный, переходный или турбулентный), имеющий критическое значение при изучении гидродинамических процессов. Это ограничение является существенным, так как реальная картина обтекания тел сильно зависит от режимов течения и, соответственно, от чисел

Рейнольдса.

Экспериментальный метод Янга и Шольца

Метод Янга и Шольца был разработан на основе метода Джонса и распространён на течения сжимаемых сред, таких как газы и жидкости, способные значительно изменять свою плотность под воздействием внешних условий (например, при высоких скоростях или переменных температурах). В отличие от методов Бетца и Джонса, где предполагается постоянство плотности, этот метод позволяет учитывать её изменения и, следовательно, расширяет область применения на сверхзвуковые и околосвуковые течения.

Метод Янга и Шольца базируется на том же принципе выделения контрольной поверхности вокруг исследуемого тела, но основным отличием является явное рассмотрение сжимаемости среды через число Маха и плотность потока. Таким образом, уравнение неразрывности жидкости в методе Янга и Шольца приобретает следующий вид (3.4):

$$\rho \cdot u \cdot dy = \text{const}, \quad (3.4)$$

где ρ – плотность жидкости или газа в сечениях потока, кг/м³,

u – скорость потока, м/с,

dy – элемент сечения контрольного объёма, через который проходит жидкость или газ.

С учётом изменения скорости и плотности потоков, коэффициент профильного сопротивления среды определяется с использованием следующего выражения (3.5):

$$C = 2 \int \sqrt{\frac{g_2 - p_2}{g_\infty}} \left(1 - \sqrt{\frac{g_2 - p_\infty}{g_\infty}} \right) d\left(\frac{y}{l}\right), \quad (3.5)$$

Здесь предполагается, что полное давление струйки остаётся постоянным при движении от входного к выходному сечению ($I \rightarrow II$), а именно (3.6):

$$g_\infty = g_2 = \text{const}, \quad (3.6)$$

Однако в отличие от предыдущих методов (Бетца и Джонса), в формуле учитывается векторное разложение скорости потока и влияние числа Маха, что существенно увеличивает точность при анализе скоростных потоков, близких к

скорости звука.

Главная особенность метода Янга и Шольца состоит в учёте влияния числа Маха, определяемого как отношение скорости потока к местной скорости распространения звука в данной среде. Зависимость от числа Маха позволяет эффективно использовать данный метод для течений, в которых появляются эффекты сжимаемости, искажающие классическую картину течения.

При этом скорость течения среды за телом раскладывается на векторы, отражающие направление и характер изменения скорости в сечении II (3.7):

$$\vec{u}_2 = u_{2x}\vec{i} + u_{2z}\vec{k}, \quad (3.7)$$

где компоненты скорости потока учитывают изменения в направлении течения и позволяют адекватно описывать пространственные эффекты, возникающие в среде.

Опыты с использованием данного метода, в частности эксперименты Хомана с маслом, позволяют наглядно наблюдать качественное изменение картины течения жидкости в зависимости от числа Рейнольдса. На небольших числах Рейнольдса поток масла за цилиндром остается ламинарным, и сопротивление формируется преимущественно за счёт вязких сил. При увеличении чисел Рейнольдса начинают формироваться регулярные вихри (вихревая дорожка Кармана). Дальнейшее увеличение числа Рейнольдса приводит к переходу к турбулентному течению, сопровождающемуся образованием хаотически расположенных вихрей и резким изменением параметров сопротивления.

Формула, полученная на основании исследований Хомана и аналогичных опытов, позволяет с высокой точностью определять коэффициенты лобового сопротивления и сопротивления завихрения при различных условиях (3.8):

$$C_d = f(\text{Re}, M, \rho, \mu, \text{форма тела}), \quad (3.8)$$

где Re – число Рейнольдса,

M – число Маха,

ρ – плотность среды, кг/м^3 ,

μ – вязкость среды, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Достоинства экспериментального метода Янга и Шольца

Расширение диапазона применимости: Метод позволяет учитывать эффекты сжимаемости среды и применять его для сверхзвуковых и околозвуковых течений, что существенно расширяет область его применения по сравнению с классическими несжимаемыми подходами (методами Бетца и Джонса).

Более точное описание течения благодаря учёту вектора скорости и пространственного распределения давлений и скоростей. Этот подход даёт возможность более адекватно описать явления, возникающие за телом, в том числе вихревые структуры и неоднородности течения.

Универсальность и гибкость, так как в формуле содержатся параметры, явно зависящие от реальных физических условий эксперимента.

Недостатки экспериментального метода Янга и Шольца

Не учитывает напрямую геометрические особенности тела, аналогично методам Бетца и Джонса. Влияние формы тела косвенно отражается лишь через коэффициенты сопротивления и число Рейнольдса.

Отсутствует учёт температурных градиентов среды, что ограничивает применение метода для расчётов гидродинамических характеристик в средах с сильным изменением температуры или тепловым воздействием на поток.

Высокая сложность обработки результатов в случае значительных колебаний скоростей и давлений в зоне измерений, особенно при турбулентных течениях, где необходимо множество замеров и дальнейшее статистическое усреднение результатов.

Ограничения на точность измерений из-за близости контрольного сечения ко следу тела, что может приводить к нестабильности и необходимости дополнительных мер для снижения измерительных погрешностей.

При выборе способа определения гидродинамического сопротивления необходимо руководствоваться характером движения тела. В случае движения по морской поверхности (морские суда) тело испытывает сопротивление, связанное с движением потока жидкости, таким образом для его определения можно воспользоваться экспериментальным методом Джонса или Бетца, определив

лобовое и хвостовое сопротивление. Однако в случае движения тела в массиве жидкости (подводные лодки и аппараты), тело испытывает нагрузку одновременно со всех сторон, в связи с чем большинство возникающих сил направлено вверх, а не в сторону. На основании этого утверждения был сформулирован парадокс Д'Аламбера: утверждение в гидродинамике идеальной жидкости, согласно которому при стационарном обтекании твёрдого тела безграничным поступательным прямолинейным потоком невязкой жидкости, при условии выравнивания параметров далеко впереди и позади тела, сила сопротивления равна нулю.

Таким образом становится ясно, что для определения коэффициента гидродинамического сопротивления среды, необходимо рассматривать тело, погружаемое в покоящуюся жидкость.

3.3 Стенд для исследования воздействия гидродинамического сопротивления

Приняв, что промежуточная капсула большую часть времени погружается с постоянной скоростью, формула определения постоянной скорости ($\frac{dv}{dt} = 0$) имеет вид (3.9):

$$v = \sqrt{\frac{2(\rho_t - \rho_f) \cdot V_t g}{\rho_f C_d S}}, \quad (3.9)$$

Принимая объем постоянным, можно сделать вывод о наличии зависимости между плотность (массой) капсулы, скорость погружения и коэффициентом сопротивления среды.

На этом основании был разработан стенд для определения скорости погружения образца в воду, по результатам которой были получены значения скорости погружения, а также коэффициента сопротивления (рисунок 3.2). На основании проведенного эксперимента определены необходимые коэффициенты для валидации компьютерной модели.

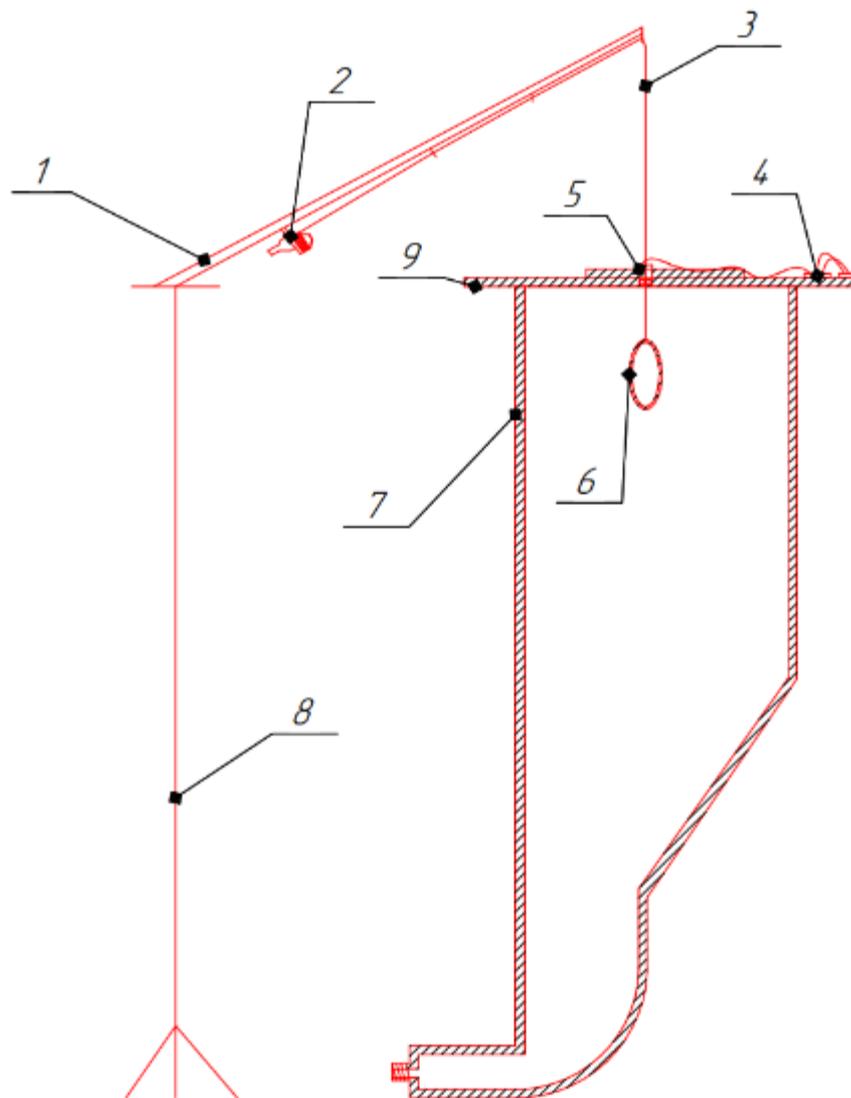


Рисунок 3.2 – Схема испытательного стенда

1 – удилице, 2 – катушка, 3 – нить не растягивающаяся, 4 – блок электроники Arduino, 5 – щелевой датчик, 6 – исследуемый образец, 7 – корпус высотой в 1000 мм, 8 – штатив, 9 – крышка корпуса

Стенд разработан для определения скорости погружения образца в воду (рисунок 3.3). На крышке 9 жестко закреплен блок электроники Arduino 4 и щелевой датчик 5, который обеспечивает фиксацию прохождения «флагов», закрепленных на не растягивающейся нити 3. Блок электроники Arduino состоит из программируемого микроконтроллера Arduino Uno, платы размещения логики и аккумуляторной батареи. Для работы микроконтроллера была написана программа на языке программирования C++.



Рисунок 3.3 – Фото станда

На выходе код программы выдает значение скорости погружения капсулы, коэффициента сопротивления и годовой производительности, на основании разработанной методики.

Для первичного эксперимента были изготовлены модели промежуточной капсулы, многосекционные (рисунок 3.4). Материал капсул – алюминий, произведены капсулы в мастерских Санкт-Петербургского горного университета (рисунок 3.5).

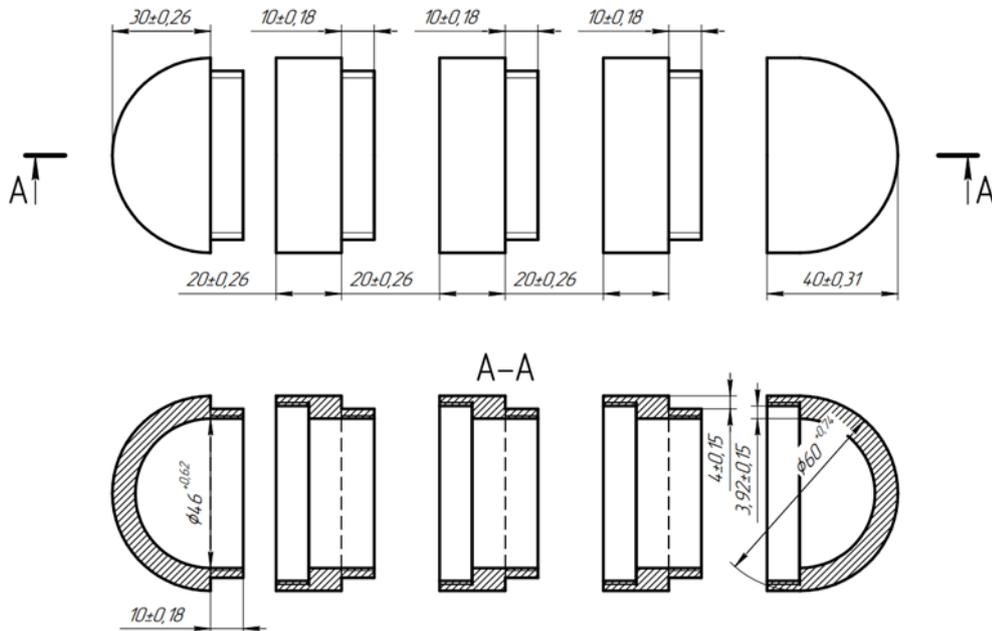


Рисунок 3.4 – Схема-чертеж модели промежуточной капсулы



Рисунок 3.5 – Изготовленная модель капсулы для первичного эксперимента

Так как для определения плотности необходимо знать массу капсулы, то для взвешивания использовались весы неавтоматического действия DL-5000 компании «AND» (рисунок 3.6), с точностью измерения 0,1% от грамма. Весы откалиброваны и соответствуют заявляемой точности.



Рисунок 3.6 – Использованные весы для определения массы капсулы, DL-5000 компании «AND»

Для фиксации времени прохождения размеченных «флагов» использовался оптический щелевой датчик компании DATALOGIC с частотой измерения до

10000 Гц, что позволяет считывать значения с точностью до 1 мс (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Оптический щелевой датчик, компании DATALOGIC с частотой 10000 Гц

Подготовка к эксперименту

• Предварительная характеристика моделей

Каждая модель взвешивается и её основные линейные размеры фиксируются. По результатам измерений рассчитывается ориентировочный объём, а при необходимости корректируется балласт, чтобы обеспечить тонущие свойства и близкое соотношение «масса/объём» между образцами.

Для начальной модели были определены следующие параметры: внешний объём составил 253 см³, масса составила 303,2 грамма, плотность составила 1198 кг/м³. В дальнейшем внутренняя полость капсулы загружалась грузом по 5 грамм, что при неизменном объеме давало прирост плотности в 20 кг/м³. Таким образом для каждой капсулы был выбран диапазон плотностей от 1200 до 1400 кг/м³. В реальности изменение плотности соответствует увеличению толщины стенки капсулы.

• Подготовка резервуара

Резервуар или опытный бассейн заполняется водой с постоянными

плотностью и температурой (при работе в естественных условиях параметры фиксируются). Если проводится серия запусков, рекомендуется дать воде успокоиться после установки моделей и снятия предыдущих результатов.

Лабораторная морская была подготовлена в соответствии с ГОСТом по подготовке морской воды, а именно разбавлением 65 грамм пищевой соли на литр воды, в следствии чего принято значение плотности воды 1065 кг/м^3 .

• Исходное положение моделей

Каждая модель устанавливается у поверхности воды так, чтобы начальная скорость была пренебрежимо мала (из состояния покоя), или же опускается на небольшую глубину для минимизации поверхностных брызг и турбулентных возмущений.

Установка работает следующим образом. На нити закреплены 2 «флага» (отметки которые фиксирует щелевой датчик). Расстояние между «флагами» фиксированное и составляет 700 мм. Катушка разжимается и начинается свободное падение капсулы. Для уменьшения воздействия величины трения, вместо кольца на вершине удилица установлен шариковый подшипник. При погружении капсулы, нить следует за ним и «флаги» приближаются к датчику. При проходе первого «флага» через датчик, потенциал сменяется с высокого на низкий и датчик подает сигнал на микроконтроллер, который начинает отсчет времени. Когда второй «флаг» проходит через датчик, опять происходит смена потенциала и датчик подает сигнал остановить таймер. После чего, принимая в расчет потраченное время и входные параметры, такие как масса капсулы, ее полезный объем, соотношение осей эллипсоида и прочие, алгоритм выдает решение системы уравнений, позволяя оценить с достаточно высокой точностью значение искомых параметров. Опыт проводился с цилиндрической, обтекаемой, кубической и сферообразной формой капсулы. Для определения оптимальных размеров толщины стенки капсулы в полость модели помещали различный груз, для увеличения значения плотности. Пример опыта №6 с цилиндрической формой капсулы плотностью 1300 кг/м^3 представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результат серии эксперимента №6 (плотность 1300 кг/м³)

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
1	3,154	0,7	0,2219	0,2424	0,388
2	3,025		0,2314		
3	3,211		0,2180		
4	3,098		0,2260		
5	3,094		0,2262		
6	3,110		0,2251		
7	3,160		0,2215		
8	3,099		0,2259		
9	3,112		0,2249		
10	3,140		0,2229		

Изменяя плотность цилиндрической модели капсулы в диапазоне от 1200 кг/м³ до 1400 кг/м³, с шагом 20 кг/м³, получим следующие графики коэффициента сопротивления (рисунок 3.8) и средней скорости погружения (рисунок 3.9):

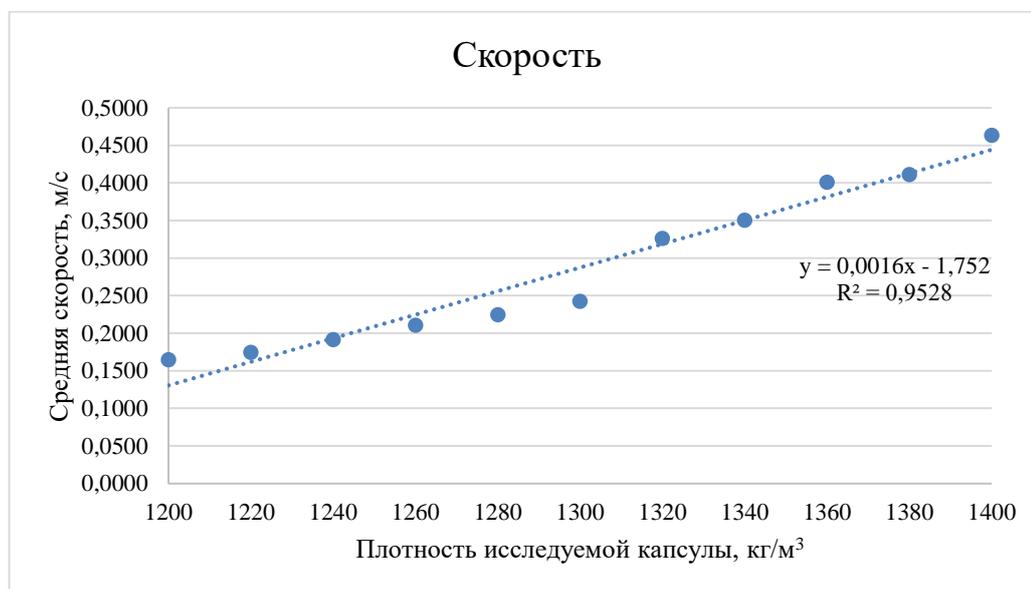


Рисунок 3.8 – График зависимости скорости погружения от плотности тела. Получен экспериментально

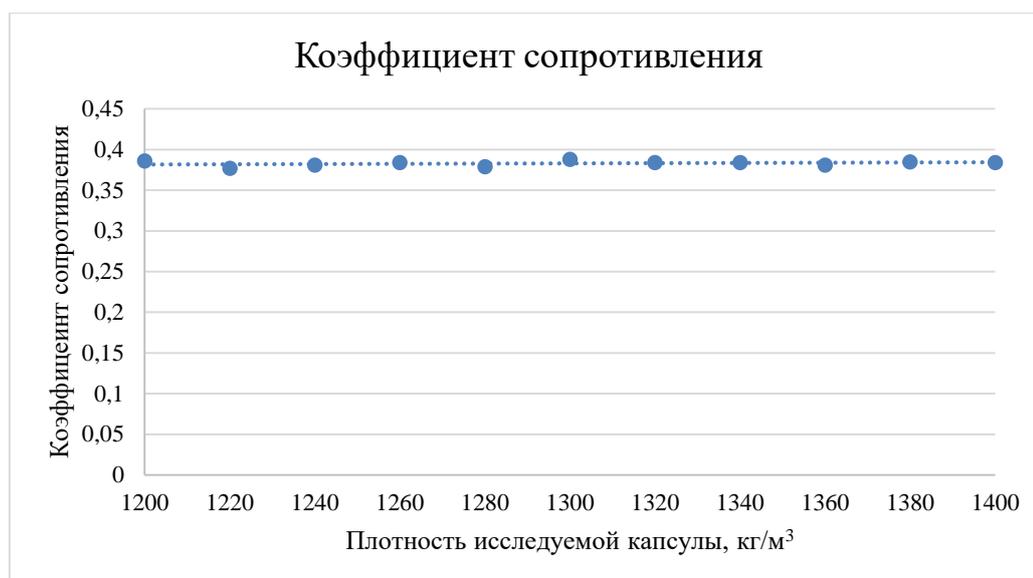


Рисунок 3.9 – График зависимости коэффициента сопротивления от плотности тела. Получен экспериментально

Исследуя полученные графики, можно сделать вывод, что с увеличением плотности тела, увеличивается скорость погружения, что логично следует из уравнения движения (2.21). Однако коэффициент сопротивления не зависит от изменения плотности, а значит можно сделать вывод о постоянном коэффициенте для данной формы. Для цилиндра с торцевыми полусферами он составляет примерно 0,328.

Зная значение коэффициента для одной формы, вместо проведения бесчисленного числа экспериментов, для определения рациональной формы капсулы, воспользуемся компьютерным моделирование в программе ANSYS CFX.

3.4 Оценка погрешности эксперимента

При обработке экспериментальных данных будем учитывать, что есть два вида погрешности эксперимента: случайные погрешности и приборные погрешности.

Случайные погрешности – это погрешности, которые при многократных измерениях в одинаковых условиях изменяются непредсказуемым образом. Эти погрешности обусловлены множеством неконтролируемых факторов, действие которых различно при повторении измерений. В результате при измерении одной и той же величины несколько раз в одинаковых условиях получается ряд различных значений, отличающихся от истинного значения случайным образом,

как в большую, так и в меньшую сторону [33].

Приборные погрешности обусловлены принципиальным несовершенством и ограниченной точностью измерительных приборов.

Измерения так же могут быть разделены по типу на прямые и косвенные. В нашем случае измерения являются косвенными, так как необходимая величина (Скорость погружения v) находится путем вычислений с использованием нескольких прямо измеренных величин.

Так одной из основных операций при обработке результатов измерений является нахождение доверительного интервала. Ниже приведем алгоритм нахождения доверительного интервала для прямого измерения (в нашем случае – это измерение времени).

Так, для начала, необходимо найти наиболее вероятное значение x , для этого вычислим среднее арифметическое выборки по формуле, отметим, что в большинстве случаев $x \approx \bar{x}$ (3.10):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.10)$$

Далее определяем абсолютные погрешности отдельных измерений следующим выражением: $\Delta x_i = |x_i - \bar{x}|$. Определяется средняя квадратичная ошибка среднего арифметического по следующей формуле (3.11):

$$S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \quad (3.11)$$

Доверительный интервал случайной составляющей погрешности результата измерения обычно расположен симметрично относительно величины \bar{x} . Значение доверительной границы случайной величины Δx^{c6} вычисляется по формуле (3.12):

$$\Delta x^{c6} = t_{\gamma} S_{\bar{x}}, \quad (3.12)$$

Коэффициент доверия (коэффициент Стьюдента) t_{γ} в общем случае зависит от объема выборки n и выбранной доверительной вероятности α (для технических измерений обычно $\alpha = 0,95$) и определяется по таблицам [68].

Окончательный результат записывается в следующем виде $x = \bar{x} \pm \Delta x^{c6}$.

Оценить относительную погрешность результата серии эксперимента можно по следующей формуле (3.13):

$$\varepsilon^{cb} = \frac{\Delta x^{cb}}{\bar{x}}, \quad (3.13)$$

Далее необходимо оценить приборную погрешность эксперимента. В общем виде относительную погрешность любого приборного измерения можно записать в следующем виде (3.14):

$$\varepsilon^{np} = \frac{\Delta x^{np}}{\bar{x}}, \quad (3.14)$$

где Δx^{np} - погрешность прибора, измеряемого необходимую величину, $x_{ср.изм}$ - среднее значение измеряемой величины.

Для нахождения относительной погрешности по времени истечения t воспользуемся следующей формулой (3.15):

$$\varepsilon_t = \varepsilon_t^{cb} + \varepsilon_t^{np}, \quad (3.15)$$

Тогда относительная погрешность коэффициента сопротивления C_d (3.16):

$$\varepsilon_C = \varepsilon_t + \varepsilon_N, \quad (3.16)$$

А абсолютная погрешность (3.17):

$$\Delta t = t \cdot \varepsilon_C, \quad (3.17)$$

Итого, для определения погрешности времени имеем следующее значение:

$$t = 3,1203 \pm 0,021$$

3.5 Компьютерное моделирование процесса погружения промежуточной капсулы

На основании проведённого эксперимента было выполнено построение геометрической модели капсулы, генерация сеточной модели, проведение численного моделирования в ANSYS CFX, сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными и анализ изменения коэффициента сопротивления среды и скорости погружения капсулы при различных геометрических конфигурациях. Модель капсулы была построена на основе предоставленных чертежей, при этом особое внимание уделялось корректности геометрии и её влиянию на параметры моделирования. Были использованы три основные формы капсулы для исследования: сферическая, цилиндрическая и удлинённая. Каждая из форм позволила оценить разнообразные характеристики, такие как аэродинамическое сопротивление и взаимодействие с водной средой. Сеточная

модель была адаптирована для обеспечения точности расчётов в области контакта капсулы с водой, где формируются сложные вихревые структуры, а также для минимизации численных ошибок.

Для анализа полученных экспериментальным путем значений коэффициента сопротивления формы эксперимент был смоделирован в Ansys CFX.

Модели капсул различной формы были заключены в объем, представленный в виде куба со сторонами 100x100x100 единиц. Пример испытываемой модели в объеме представлен на рисунке 3.10.

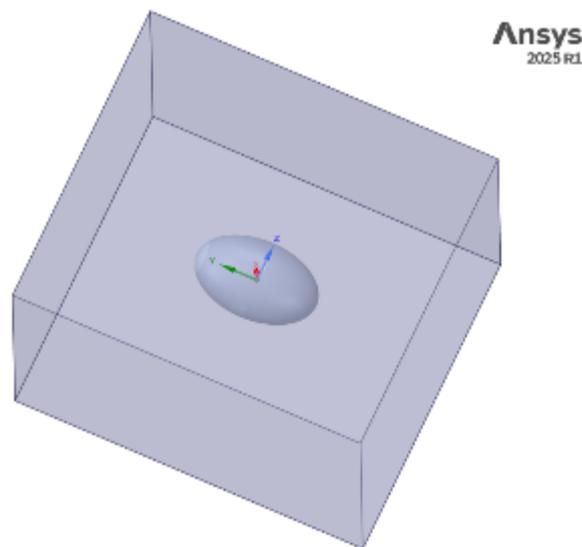


Рисунок 3.10 – Создание модели

Перед заданием граничных условий (ГУ) требовалось сгенерировать сеточную модель, для чего был использован модуль Ansys Meshing. Для более точного расчета размер ячеек был уменьшен до **5 мм**. Остальные параметры сетки были оставлены по умолчанию.

Для получения корректного результата важно правильно указать ГУ.

Для построенного объема был создан новый домен, которому были заданы свойства воды. В качестве материала для капсулы была указана сталь.

Пример сгенерированной сеточной модели представлен на рисунке 3.11.

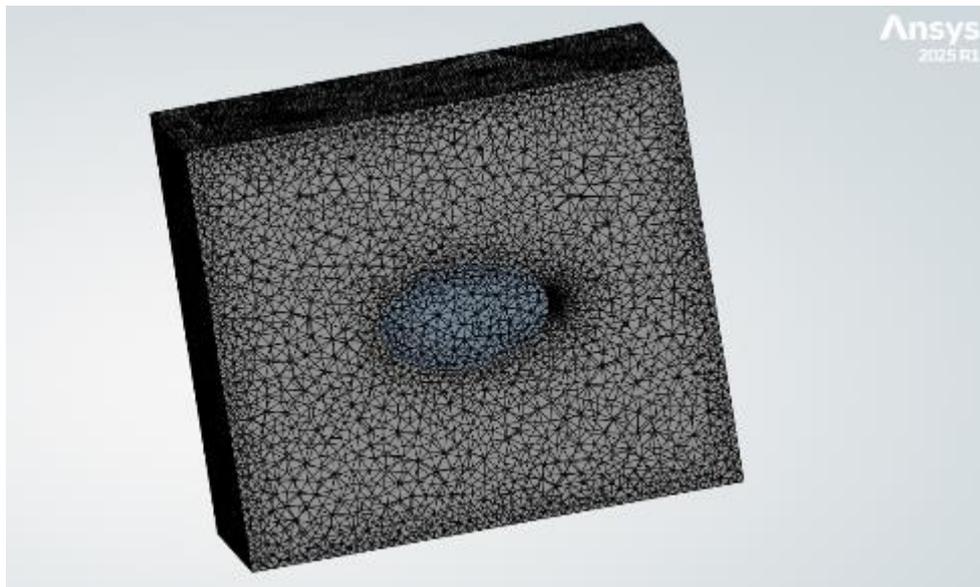


Рисунок 3.11 – Создание сеточной модели

В ГУ на вход задавала скорость от 0,1 до 1,0 м/с. По боковым граням куба установлена симметрия для моделирования симметричных полей течения. На выходе из объема было установлено среднее избыточное давление, равное 0 Па. На верхнюю и нижнюю грани объема было задано ГУ Opening, допускающее течение жидкости как внутрь области, так и наружу, в то время как на выходе установлено условие Outlet, допускающее движение жидкости только из области. Давление в данном случае также равно 0 Па.

Параметры стенки были заданы при помощи Boundary-Wall. Стенки капсулы были указаны без проскальзывания (no slip wall), т.е. там происходит прилипание потока.

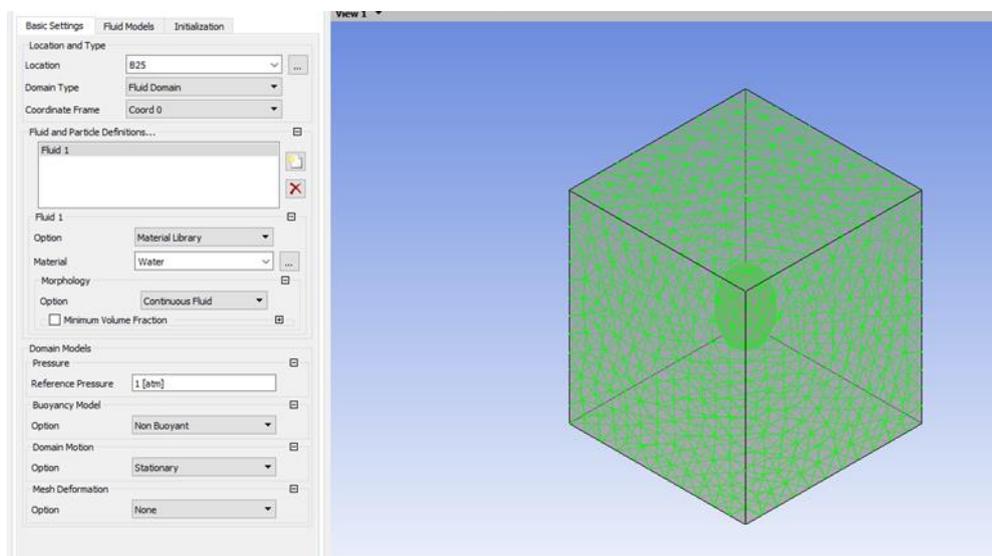


Рисунок 3.12 – Задание параметров жидкости

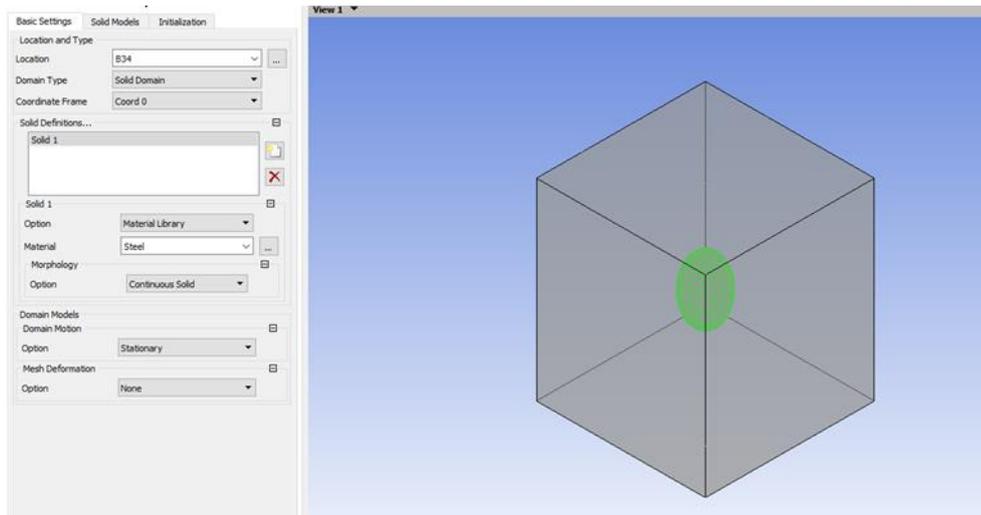


Рисунок 3.13 – Задание параметров капсулы

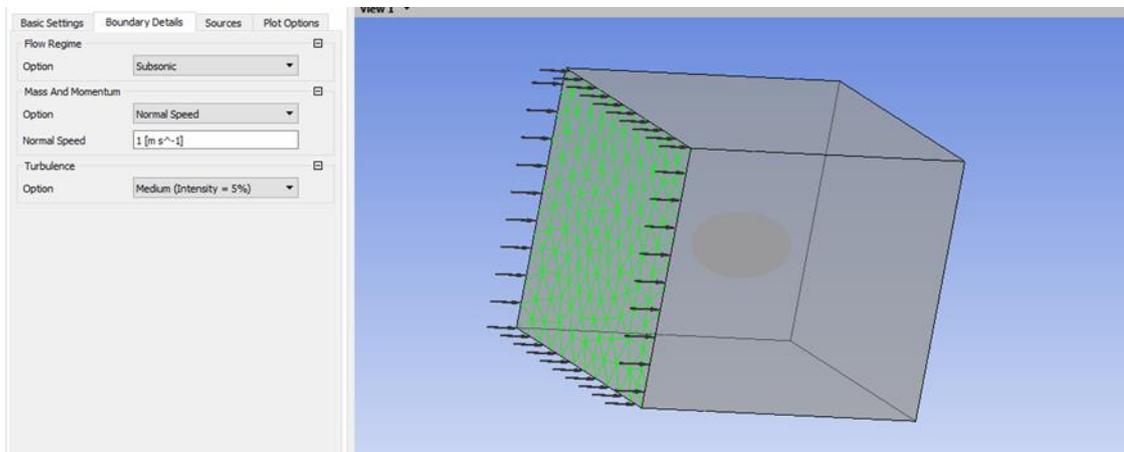


Рисунок 3.14 – Задание скорости на входе

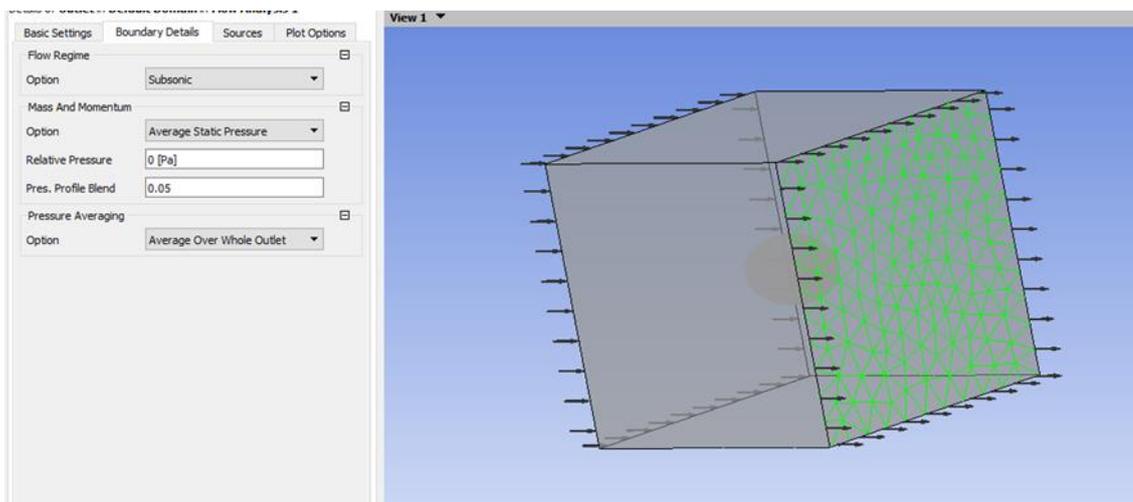


Рисунок 3.15 – Задание ГУ на выходе

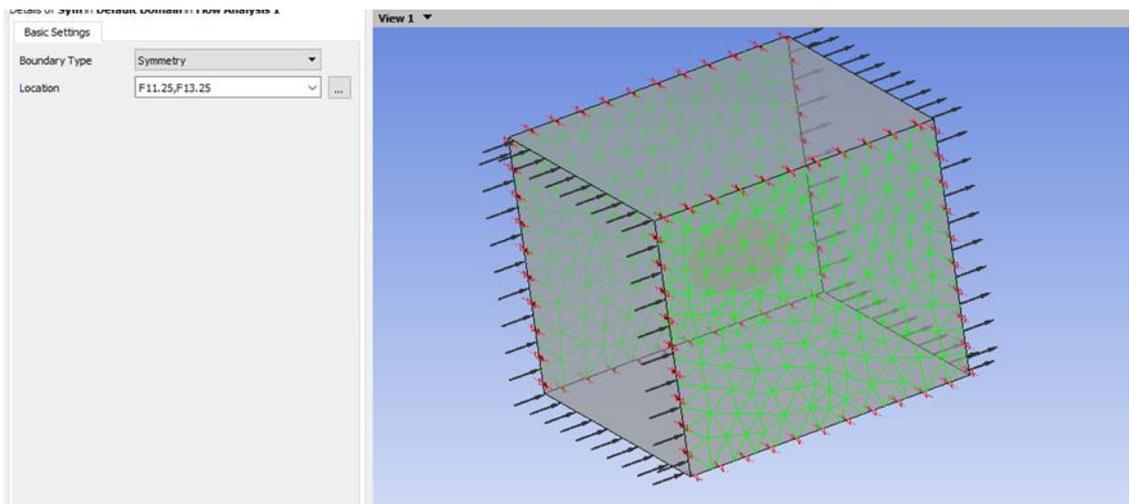


Рисунок 3.16 – Задание симметрии

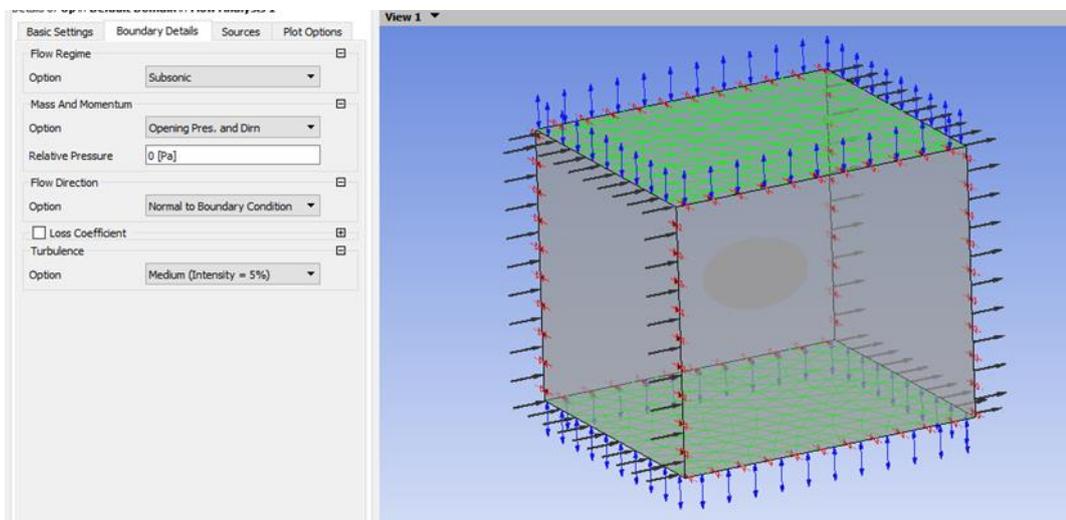


Рисунок 3.17 – Задание открытого входа/выхода

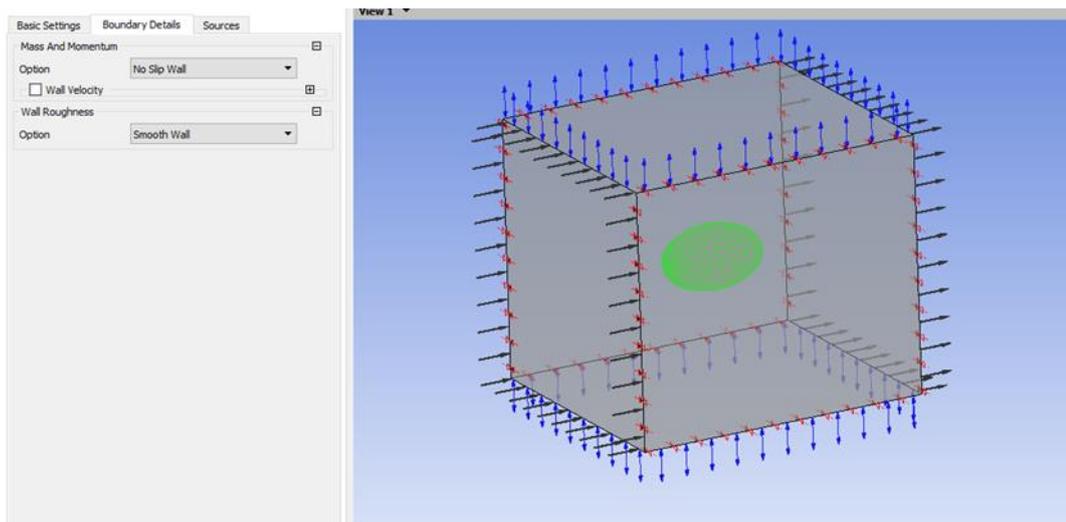


Рисунок 3.18 – Настройка параметров стенок

Для расчёта использовался метод конечных элементов. В ANSYS CFX была реализована двухфазная модель с использованием уравнений Навье–Стокса, что

позволило описать движение воды и поведение капсулы в среде с высокой точностью. Граничные условия включали скорость свободной поверхности воды, гравитационные силы и нулевую начальную скорость капсулы. Также применялись усовершенствованные подходы к моделированию турбулентности для получения реалистичных результатов. Сравнение численных данных с экспериментальными результатами проводилось с использованием контрольных данных, которые подтверждали точность модели. Основными параметрами для анализа были коэффициент сопротивления среды и скорость погружения капсулы, которые непосредственно связаны с её формой и динамическими свойствами.

Для того чтобы определить адекватность работы модели необходимо ее верифицировать с полученными экспериментальными данными. Для этого обратным методом зададим коэффициент сопротивления и оценим полученную скорость при различных плотностях (рисунок 3.19).

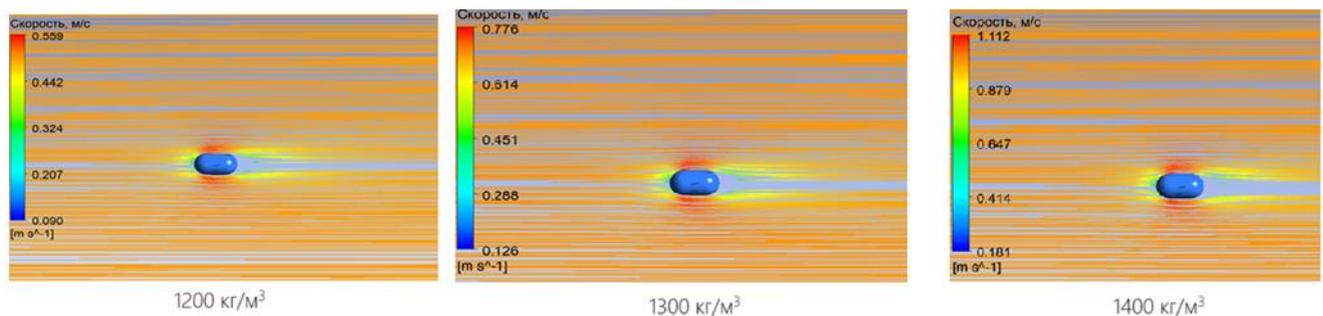


Рисунок 3.19 – Верификация модели с экспериментальным исследованием

Сравнение численных данных с экспериментальными подтвердило высокую точность моделирования. Расхождение между моделированием и экспериментом не превышало 6,8 %, что позволяет утверждать о достоверности представленной модели. Это подтверждает её пригодность для дальнейшего использования при разработке и оптимизации форм капсул для различных применений, таких как подводные аппараты или медицинские устройства. Данный подход обеспечивает возможность детального анализа сложных гидродинамических процессов и предлагает надёжный инструмент для прогнозирования поведения объектов в воде.

Результаты моделирования показали, что коэффициент сопротивления среды изменяется в зависимости от формы капсулы (рисунок 3.20).

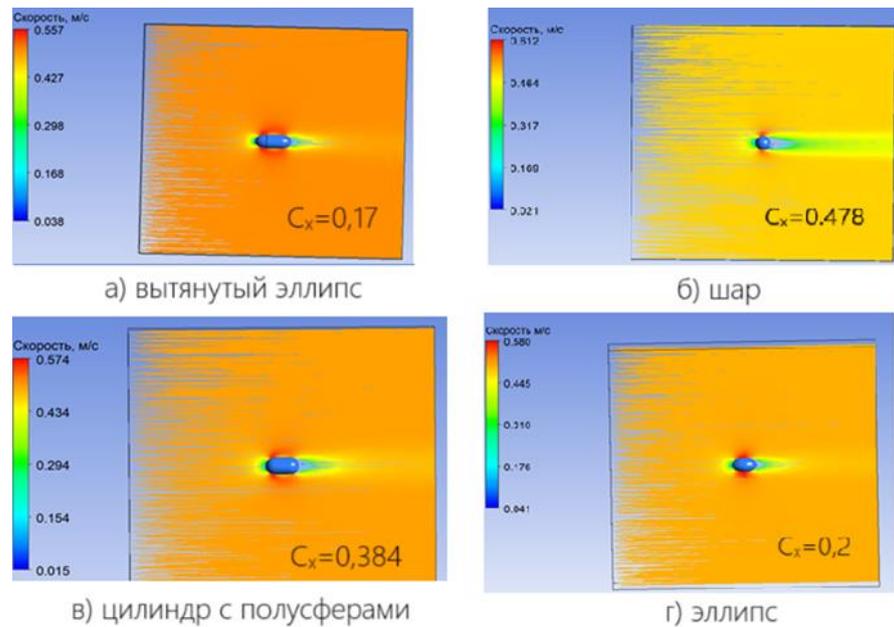


Рисунок 3.20 – Расчет коэффициент лобового сопротивления, при различных формах капсулы. Скорость 0,5 м/с

Наименьшее сопротивление среды отмечено для вытянутого эллипса ($C_x = 0,17$), что объясняется его аэродинамически оптимизированной формой. Благодаря значительному удлинению корпуса происходит более плавное обтекание жидкости вдоль продольной оси тела, минимизируется величина области отрыва потока и размеры вихревой зоны за объектом.

Наибольший коэффициент сопротивления наблюдается для капсулы сферической формы ($C_x = 0,478$). Это обусловлено образованием выраженной зоны отрыва потока жидкости за телом, сопровождающейся турбулентными завихрениями. Сферическая форма характеризуется относительно резким изменением профиля поверхности тела, что провоцирует интенсивный отрыв пограничного слоя жидкости и формирование большой области завихрения позади тела, повышающей сопротивление.

Цилиндр с торцевыми полусферами демонстрирует промежуточное значение коэффициента сопротивления ($C_x = 0,384$). Данная геометрия частично снижает турбулентность и вихревые процессы за счёт плавного перехода от цилиндрической к сферической поверхности, однако величина сопротивления остаётся выше, чем у эллиптических форм из-за менее эффективного обтекания в центральной цилиндрической области.

Эллипс с меньшим удлинением также характеризуется относительно низким сопротивлением ($C_x = 0,2$). Постепенное изменение радиуса кривизны уменьшают интенсивность отрыва пограничного слоя и размеры турбулентной зоны за объектом, хотя и уступают более вытянутой конфигурации.

Важную роль в формировании коэффициента сопротивления при движении тел в жидкости играет пограничный слой, представляющий собой тонкий слой жидкости, прилегающий непосредственно к поверхности тела, в котором происходят существенные изменения скорости и давления. Коэффициент сопротивления зависит от состояния и развития пограничного слоя, его устойчивости к отрыву и формирования зон турбулентности.

Тем не менее, при рассмотрении гидродинамических процессов погружения объектов значительного размера, влияние вязкостного (ламинарного) пограничного слоя на общий коэффициент сопротивления среды зачастую можно считать незначительным. Это связано с тем, что для объектов большой характерной длины и значительных скоростей потока жидкость, как правило, переходит в турбулентное течение на значительном удалении от передней точки контакта тела и формирует доминирующую по величине зону турбулентного отрыва потока. Это явно отображено на рисунке 3.21.

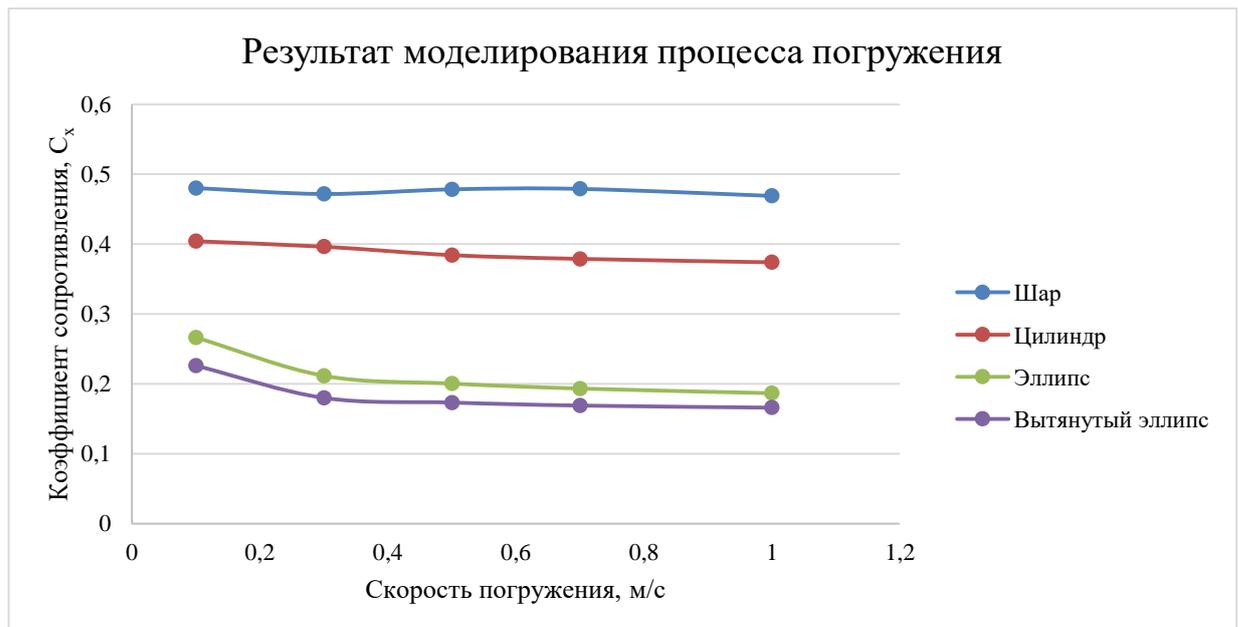


Рисунок 3.21 – Результат моделирования процесса погружения промежуточной капсулы разной геометрической формы при разной заданной скорости

Графики изменения коэффициента сопротивления для различных форм капсулы продемонстрировали, что удлинённая форма показала снижение коэффициента на 15 % по сравнению с эллиптической формой. Это связано с уменьшением лобового сопротивления и более обтекаемой формой, которая минимизирует турбулентные эффекты. Удлинённая форма показала наиболее высокую скорость погружения, тогда как сферическая капсула из-за большего коэффициента сопротивления имела минимальную скорость. Эти выводы иллюстрируют сильную взаимосвязь между геометрией капсулы и её гидродинамическими характеристиками.

Приведем некоторые результаты процесса моделирования эллиптической формы (рисунок 3.22) и удлинённой эллиптической формы (рисунок 3.23).

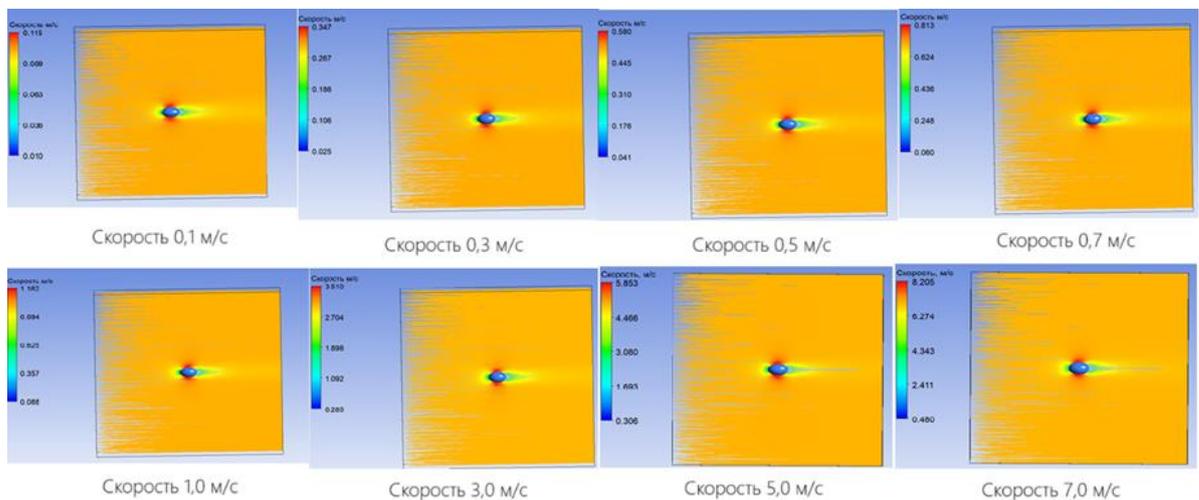


Рисунок 3.22 – Моделирование процесса погружения эллиптической капсулы при разных скоростях погружения

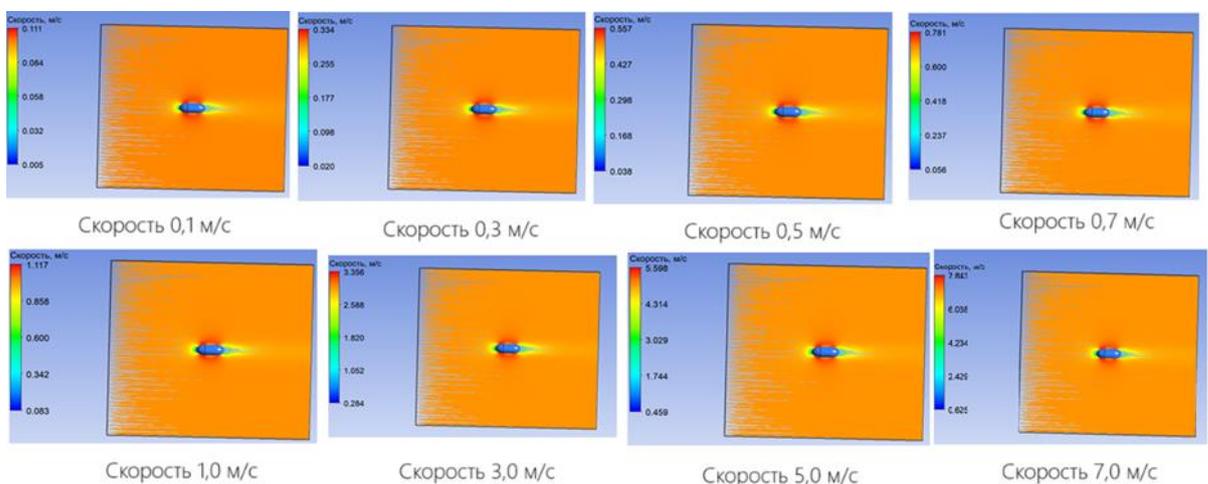


Рисунок 3.23 – Моделирование процесса погружения вытянутой эллиптической капсулы при разных скоростях погружения

На представленных изображениях отчётливо видна тенденция увеличения длины турбулентного следа за капсулами с ростом скорости погружения. В начальном диапазоне скоростей (0,1–0,7 м/с) за обоими типами капсул формируется сравнительно компактная зона возмущения, характеризующаяся небольшой протяжённостью и умеренной интенсивностью вихрей. С увеличением скорости (от 1,0 м/с и выше) зона турбулентности значительно вытягивается вдоль оси движения, сопровождаясь ростом интенсивности возмущений и формированием отчётливых зон рециркуляции.

Для капсулы вытянутой эллипсоидальной формы точка отрыва пограничного слоя при низких скоростях расположена ближе к задней оконечности, где происходит плавный сход потока. С повышением скорости эта точка смещается вперёд, ближе к середине корпуса, что приводит к значительному росту турбулентной области и увеличению сопротивления среды за счёт интенсивной генерации вихрей.

В случае капсулы более компактной эллипсоидальной формы при аналогичных скоростях точка отрыва пограничного слоя изначально располагается ближе к центральной области задней поверхности. При росте скорости эта точка отрыва также заметно сдвигается в направлении передней части капсулы, вызывая значительное удлинение и интенсивное развитие турбулентного следа, однако за счёт меньшего удлинения формы турбулентная зона оказывается более концентрированной вблизи объекта.

Важным является тот факт, что при равных миделевых сечениях (поперечных площадях) капсулы различной формы демонстрируют различный гидродинамический отклик, обусловленный именно геометрией и формой корпуса. Вытянутая капсула при высоких скоростях демонстрирует преимущество в более позднем отрыве потока и, как следствие, менее выраженном сопротивлении по сравнению с капсулой менее вытянутой формы, благодаря постепенному изменению градиента давления вдоль её поверхности.

Однако несмотря на сильное снижение коэффициента сопротивления, при использовании эллипсоидной формы происходит также и снижение

производительности, вследствие уменьшения внутреннего полезного объема, по сравнению с сосудом цилиндрической формы. Увеличение производительности можно достичь путем увеличения скорости подъема. Однако в таком случае, возрастают энергозатраты лебедочного привода, что негативно отображается на энергоэффективности комплекса. Поэтому, в качестве рационального выбора формы, принято решение исследовать цилиндрическую форму капсулы.

Зная, что примерная терминальная скорость промежуточной капсулы составляет 0,5 м/с, построим зависимость изменения коэффициента сопротивления от заданного коэффициента формы, при одинаковом миделевом сечении и плотности сосуда. Результат моделирования приведен на рисунке 3.24.

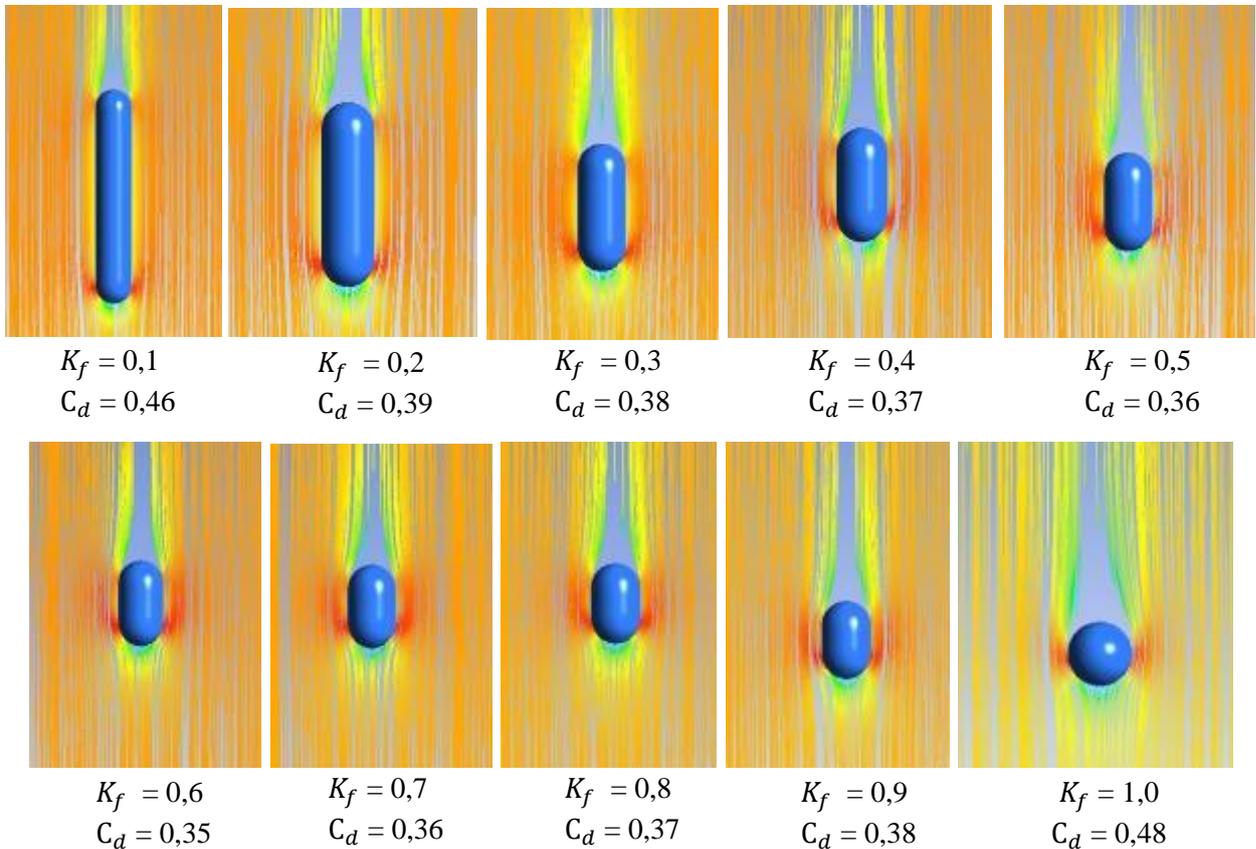


Рисунок 3.24 – Результат моделирования цилиндрической промежуточной капсулы при различных значениях коэффициента формы

Сформировав результаты моделирования в зависимости от коэффициента формы, получим следующий график зависимости коэффициента сопротивления цилиндрической промежуточной капсулы от ее коэффициента формы (рисунок 3.25):

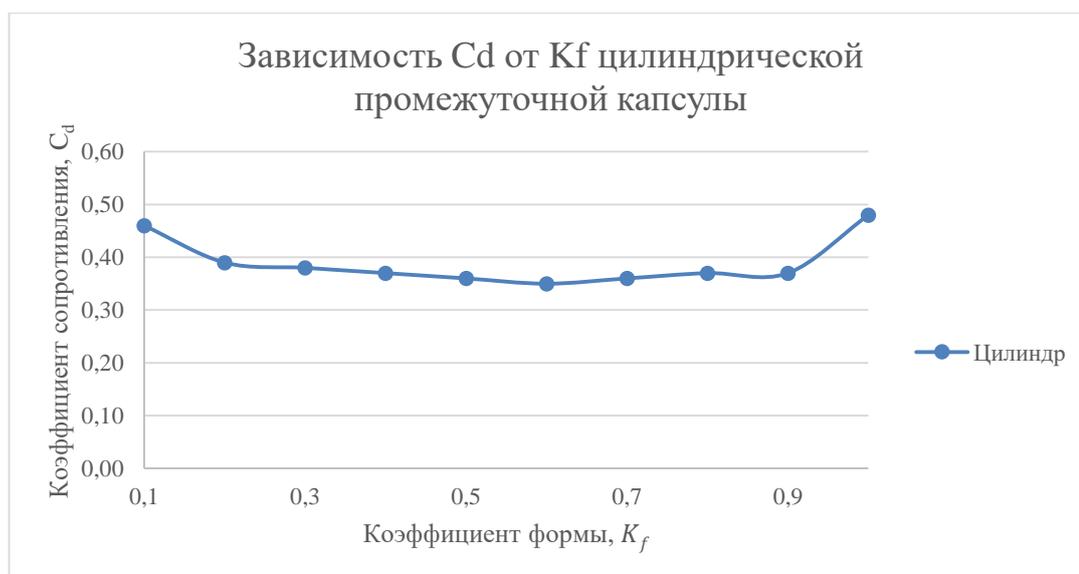


Рисунок 3.25 – Зависимость коэффициента сопротивления от коэффициента формы цилиндрической промежуточной капсулы

Исследуя график на рисунке 3,25, можно сделать вывод, что крайние значения коэффициента формы ($K_f = 0,1$ и $K_f = 1$), сильно повышают значение коэффициента сопротивления. Это связано с тем, что при увеличении длины капсулы в определенный момент сильное влияние оказывает преобладающая сила трения пограничного слоя о стенки капсулы. А при малых размерах капсулы, позади капсулы происходит смешивание оторванного пограничного слоя, что приводит к образованию турбулентных зон пониженного давления. Эти зоны формируют замедляющий эффект, тем самым повышает общее сопротивление капсулы к погружению. Диапазон изменения коэффициента сопротивления для других значений находится в диапазоне от 0,39 до 0,35, однако наименьшее значение достигается при коэффициенте формы около 0,6.

Таким образом, рациональное значение коэффициента формы K_f цилиндрической промежуточной капсулы составляет 0,6, что соответствует наименьшему значению коэффициента сопротивления $C_d \approx 0,35$. Проведя перерасчет с новыми значениями коэффициентов формы и сопротивления, и установив необходимую производительность в 920000 т/год, можно определить, что для таких K_f и C_d , значение энергоемкости процесса транспортирования составляет 9,1 кВт/т.

3.6 Масштабирование экспериментальных значений на действительные размеры

Масштабирование экспериментальных данных с маломасштабных моделей на модели реальных размеров представляет собой сложную задачу, которая требует внимательного рассмотрения множества факторов и нюансов, возникающих вследствие различий условий проведения опытов и эксплуатации реальных объектов. Это обусловлено спецификой гидродинамических процессов, таких как погружение промежуточной капсулы в глубоководной среде при добыче твердых полезных ископаемых, которые существенно зависят от масштабного фактора, числа Рейнольдса, характеристик пограничного слоя, формы тела и особенностей взаимодействия с жидкостью.

Первым важным аспектом при переносе экспериментальных данных является соблюдение условия подобия между экспериментальной моделью и реальной конструкцией. Соблюдение подобия обеспечивается выполнением геометрического, кинематического и динамического соответствия. Геометрическое подобие достигается при строгом соблюдении пропорций между всеми линейными размерами модели и натурального объекта. При этом характерные линейные размеры выбираются исходя из условий задачи, например, диаметр и высота цилиндрической промежуточной капсулы должны масштабироваться одинаково, чтобы обеспечить подобие процесса погружения. Кинематическое подобие предполагает подобие траекторий движения, скоростей и направлений потоков жидкости относительно тела. Динамическое подобие связано с соблюдением пропорций сил инерции, тяжести, вязкости и давления, что на практике выражается через равенство соответствующих критериев подобия, таких как число Рейнольдса, число Фруда и число Струхала.

Важнейшим нюансом при масштабировании результатов является изменение гидродинамического сопротивления в зависимости от режима обтекания. При движении тела в вязкой жидкости возникает тонкий пограничный слой, течение в котором может быть ламинарным, переходным и турбулентным, а режим течения определяется числом Рейнольдса, вычисляемым по характерным размерам объекта

и скорости его движения. Сложность состоит в том, что на маломасштабных моделях чаще реализуются низкие значения числа Рейнольдса, при которых пограничный слой остается ламинарным, а при переходе к масштабам реальных объектов режим может меняться на турбулентный, сопровождаемый переходными процессами и отрывом пограничного слоя. Такой переход существенно меняет характеристики сопротивления, снижая или увеличивая их значения в зависимости от геометрических особенностей формы объекта. Таким образом, непосредственное перенесение коэффициентов гидродинамического сопротивления, полученных экспериментально на лабораторных моделях, без учета возможного изменения режима течения и турбулентности может привести к значительным ошибкам и несоответствию между расчетными и реальными результатами.

Также при масштабировании экспериментальных данных важным аспектом является учет различий в условиях внешней среды, таких как температура и соленость воды. Изменение температуры и солености влияет на вязкость и плотность воды, что в свою очередь оказывает влияние на гидродинамические силы, действующие на объект. Плотность воды непосредственно влияет на величину силы Архимеда, определяющей плавучесть и, соответственно, погружение тела. Вязкость влияет на характер течения жидкости вокруг капсулы, толщину пограничного слоя и его структуру, что в свою очередь существенно изменяет гидродинамическое сопротивление и, как следствие, установившуюся скорость погружения. Следовательно, при масштабировании экспериментальных результатов на реальные условия эксплуатации необходимо учитывать разницу в свойствах жидкости (плотность и вязкость), обусловленную изменением температуры и солености.

Дополнительным нюансом является учет влияния формы и ориентации объекта на его гидродинамические характеристики при масштабировании. Коэффициент гидродинамического сопротивления существенно зависит от формы тела и его ориентации относительно направления потока жидкости. Так, для тел с выраженной продольной осью (например, цилиндрических и обтекаемых

торпедообразных форм), коэффициент сопротивления сильно меняется в зависимости от ориентации – поперечной или продольной. Это обстоятельство необходимо учитывать, так как при переходе к реальному масштабу возможно изменение ориентации тела в результате воздействия внешних факторов (неравномерное распределение массы, внешние возмущения, течения и др.), что может привести к существенному изменению сопротивления и скорости погружения.

Кроме того, существует ряд практических аспектов масштабирования, связанных с конструктивными особенностями капсул. Например, изменение толщины стенки при масштабировании может влиять на прочностные характеристики и массу капсулы, что в свою очередь изменяет плотность и баланс сил при погружении. Это требует проведения расчетов и проверки на прочность конструкций при переходе от модели к натурному объекту, что также может вносить коррективы в предварительные оценки скорости и сопротивления.

Необходимо также учитывать температурный фактор и соленость окружающей жидкости, поскольку эти параметры могут существенно отличаться в лабораторных и реальных условиях эксплуатации, особенно при работе на больших глубинах, где наблюдается изменение плотности и вязкости жидкости вследствие увеличения давления и понижения температуры.

3.7 Определение рациональных параметров промежуточной капсулы циклично-поточной технологии подъема

Определение рациональных показателей выбирается в зависимости от разрабатываемой глубины месторождения. Пересчет показателей происходит в зависимости от предъявляемых технологических требований производительности и энергозатрат. Суммируя полученные данные экспериментального исследования и компьютерного моделирования, с целью определения скорости погружения капсулы и ее коэффициента гидродинамического сопротивления, для рассматриваемой глубины месторождения 3500 метров, производительности в 920 тыс. т/год можно составить следующую таблицу 3.2:

Таблица 3.2 – Рациональные показатели реальной промежуточной капсулы

Показатель	Значение
Форма	Цилиндрическая с торцевыми полусферами
Длина оси капсулы, м	27,7
Коэффициент формы	0,6
Коэффициент сопротивления	0,35
Радиус цилиндра капсулы, м	16,62
Толщина стенки капсулы, м	> 0,91

При нахождении в диапазоне выбранных значений, можно достичь наибольшей производительности при значении энергозатрат не превышающих 9,1 кВт*ч. при разработке месторождений ЖМК на глубинах свыше 3500 метров.

3.8 Выводы по главе 3

1) Обтекаемая форма (каплевидная/торпедообразная) даёт минимальный коэффициент лобового сопротивления и, как следствие, максимальную терминальную скорость среди сравниваемых образцов. Куб или иная «коробчатая» форма (с острыми углами и большой лобовой площадью) характеризуется максимальным сопротивлением и наименьшей скоростью погружения. Сфера и цилиндр при должной ориентации могут занимать промежуточное положение, причём цилиндр (особенно «вертикальный») обычно демонстрирует лучшие результаты, чем шар сопоставимого объёма и массы.

2) Полученные результаты демонстрируют влияние геометрической конфигурации на скорость погружения. Более обтекаемые формы (цилиндр с продольным движением, торпедообразная капсула) показывают большую терминальную скорость, тогда как модели с резкими гранями и большими лобовыми площадями (куб, «коробчатая» конструкция) погружаются заметно медленнее. Результаты эксперимента служат обоснованием выбора формы промежуточной капсулы при её проектировании, учитывая требования к скорости погружения, прочности при внешнем давлении и удобству размещения внутреннего оборудования.

3) Таким образом, численное моделирование в ANSYS CFX позволило достоверно предсказать гидродинамическое поведение капсулы при различных

формах. Удлиненная форма капсулы демонстрирует минимальный коэффициент сопротивления среды и наибольшую скорость погружения, что делает её наиболее эффективной с точки зрения гидродинамики. Валидация модели подтвердила её точность, что позволяет использовать её для дальнейших исследований и оптимизации. Дальнейшие работы могут быть направлены на анализ влияния изменения материала капсулы и условий окружающей среды на её гидродинамические характеристики, а также на разработку новых форм, обеспечивающих более высокую эффективность.

ГЛАВА 4 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЦИКЛИЧНО-ПОТОЧНОГО СПОСОБА

4.1 Прочностной расчет при помощи компьютерного моделирования

По предложенной технологической схеме капсула для добычи будет погружена на глубину до 1400 метров, таким образом на внешней оболочке капсулы будет возникать напряжение, которое можно рассчитать по формуле (4.1)

$$p = \rho gh, \quad (4.1)$$

где ρ – плотность жидкости, принимаем для расчёта 1065, кг/м³,

g – ускорение свободного падения, принимаем для расчёта 10, м/с²,

h – глубина погружения, м.

Избыточное давление на внешнюю оболочку капсулы составит 10 [МПа]. В предложенных условиях работа внешней оболочки капсулы будет направлена на сопротивление смятию, в таком случае можно воспользоваться формулой (4.2), предложенной для расчёта критического внешнего напряжения возникновения локального смятия, предложенной российским морским реестром судоходства «Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов» НД № 2-020301-003.

$$p = \frac{1}{k} * \frac{2E}{1-\mu^2} * \left(\frac{t_c}{D}\right), \quad (4.2)$$

где k – коэффициент запаса прочности, для расчёта принимаем равным 2,

E – модуль Юнга для принятого материала, для расчёта 210, ГПа,

μ – коэффициент Пуассона, для расчёта 0.3,

D – внешний диаметр стенки капсулы, мм,

t_c – толщина стенки капсулы, мм.

Для упрощения последующего расчёта условно можно принять, что подводная капсула представляет собой трубу полого сечения, тогда расчётная схема будет выглядеть следующим образом (рисунок 4.1).

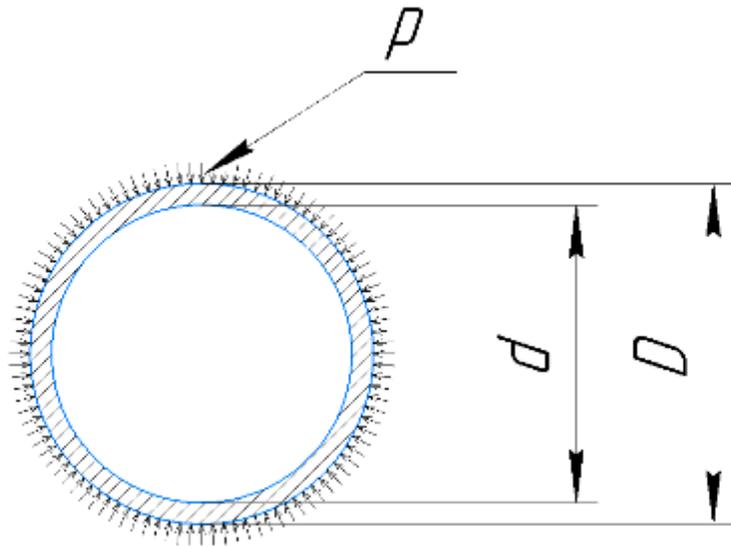


Рисунок 4.1 – Расчётная схема нагружения промежуточной капсулы

Так как формула (4.2) не даёт полного понимания зависимости толщины стенки от глубины погружения, необходимо воспользоваться промежуточными преобразованиями, а также ввести новую переменную, в виду того, что внешний диаметр стенки капсулы является величиной не исходной, а искомой, воспользуемся формулой (4.3)

$$D = d + 2 * t_c, \quad (4.3)$$

где d – внутренний диаметр капсулы, мм.

Тогда решая совместно систему уравнений (4.4)

$$\begin{cases} p = \frac{1}{k} * \frac{2E}{1-\mu^2} * \left(\frac{t_c}{D}\right) \\ D = d + 2 * t_c \\ p = \rho gh \end{cases}, \quad (4.4)$$

Получаем следующее выражение зависимости толщины стенки капсулы от глубины погружения (4.5)

$$t_c = \frac{d \cdot \sqrt[3]{\frac{k_1(1-\mu^2)\rho gh}{2E}}}{1-2 \sqrt[3]{\frac{k_1(1-\mu^2)\rho gh}{2E}}} \cdot 1000, \quad (4.5)$$

Получим следующую зависимость рисунок 4.2.

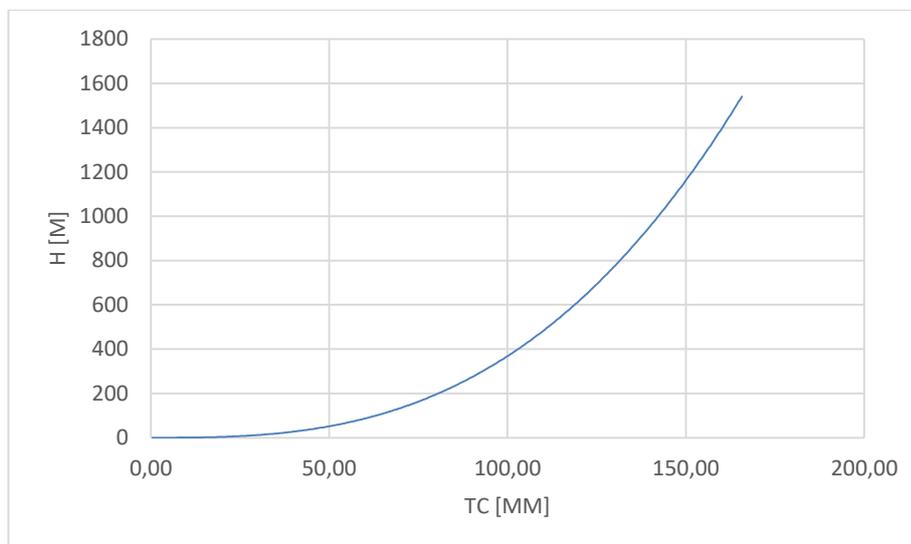


Рисунок 4.2 – График зависимости толщины стенки капсулы от глубины погружения

Из графика видно, что при глубине погружения равной 1400 метров, необходимая толщина стенки составит 160 мм.

Дальнейший расчёт будем ввести с использованием программного продукта ANSYS в модуле ANSYS Mechanical static structural, расчёт будет вестись по упрощенной модели, представляющей собой трубу с эллиптическим заглушками, а также промежуточными проставками в виде обода с жестко закрепленными к нему трубами квадратного сечения для увеличения жесткости конструкции.

Так же для упрощения расчёта необходимо пренебречь подъёмной силой и жесткостью подъёмных канатов, в виду того, что необходимо создать статически определённую систему.

В расчёте на промежуточную капсулу будет приложено давление 14 МПа, а канаты будут симитированы с помощью твёрдых тел, на грани которых будет применена команда «Fixed». Материал капсулы будет задан сталью AISI 301 российский аналог данной стали по ГОСТ 5632 07X16Н6.

Результаты расчёта представлены ниже (рисунок 4.3).

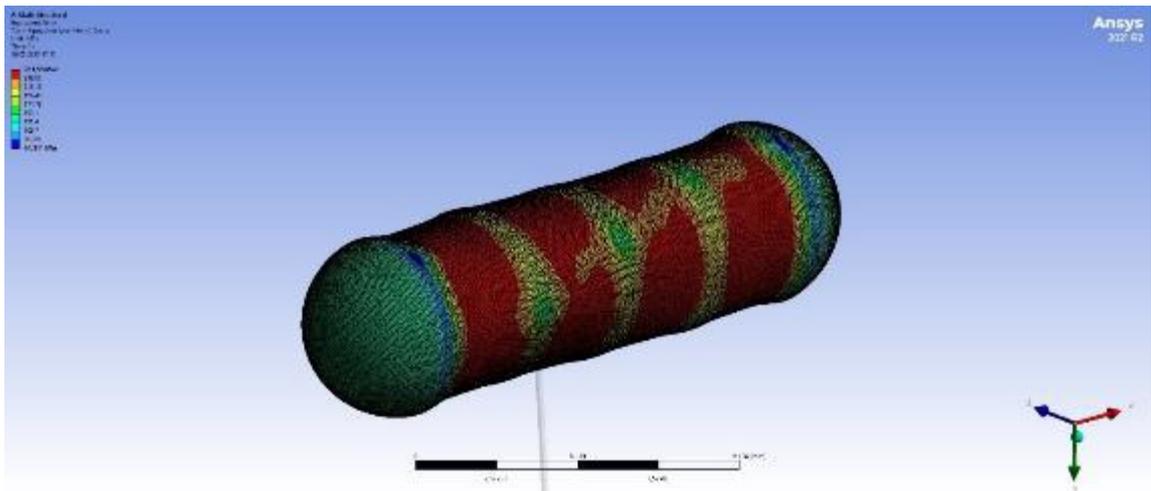


Рисунок 4.3 – Напряжение промежуточной капсулы

Учитывая, что изменение плотности промежуточной капсулы происходит за счет изменения толщины стенки капсулы, можно решив обратную задачу, определить, что для достижения плотности 1200-1400 кг/м³ необходимо задать толщину капсулы от 0,7 до 1,1 м (в зависимости от выбранной длины оси капсулы и радиуса цилиндра).

Таким образом, учитывая прочностной коэффициент запаса $k = 2,2$, согласно моделированию, требуемая толщина стенки капсулы составляет 0,352 м, что более чем в 3 раза меньше, рациональной толщины стенки. Следовательно, толщина стенки капсулы выбирается исходя из рациональных параметров капсулы, а не прочностного расчета.

4.2 Методика определения количества требуемых судов

В условиях реализации циклично-поточной технологии подъема железомарганцевых конкреций (ЖМК) с использованием промежуточной подводной капсулы, важной задачей проектирования добычного комплекса становится определение требуемого количества судов обеспечения. В отличие от классических схем с непосредственным подъемом полезной нагрузки с морского дна до поверхности, в данном подходе применяется многоэтапная логистика, включающая сбор ЖМК, их временное хранение в промежуточной капсуле и последующий подъем на поверхность судном-носителем. Методологическая база определения необходимого количества судов базируется на обратном расчете от требуемой годовой производительности к частоте циклов подъема, учитывая

особенности капсульной транспортировки и глубинных операций.

Расчёт начинается с определения часовой производительности, необходимой для достижения заданного уровня годовой добычи. Принятый режим эксплуатации комплекса – 340 дней в году по 20 часов в сутки – отражает необходимость регулярного технического обслуживания всех узлов подъема: от троса и барабанов до устройств герметизации капсулы. Таким образом, годовой фонд рабочего времени составляет около 6800 часов, что позволяет определить целевую часовую производительность комплекса.

При использовании промежуточной капсулы ключевым фактором становится её объём, грузоподъёмность, а также продолжительность одного полного цикла – от момента начала заполнения на глубине до момента выгрузки на судне. В отличие от поверхностных бункеров, капсула испытывает полное внешнее давление, поэтому её конструкция и масса существенно влияют на скорость погружения и подъема, а следовательно, на производительность. Предполагается, что капсула заполняется пульпой (смесью ЖМК и воды) под действием гидростатического давления, без использования насосов. После завершения заполнения и герметизации она поднимается тросовой системой на судно.

Цикл транспортировки включает: погружение капсулы, её заполнение, стабилизацию, подъем, разгрузку, подготовку к следующему циклу и повторное погружение. Общее время одного цикла $T_{\text{ц}}$ складывается из времени погружения $T_{\text{погр}}$, времени заполнения капсулы $T_{\text{зап}}$, времени подъема $T_{\text{под}}$, разгрузки и логистических операций $T_{\text{обсл}}$, что формально можно выразить формулой (4.6):

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{погр}} + T_{\text{зап}} + T_{\text{под}} + T_{\text{обсл}}, \quad (4.6)$$

При глубине месторождения порядка 4000 м, и допустимой скоростью вертикального перемещения 1,5–2,5 м/с, время подъема и опускания капсулы может составлять 0,45–0,75 часа. При этом время заполнения капсулы за счёт гидростатического давления обычно не превышает 10–20 минут, а разгрузка на поверхности может занять до 30 минут, в зависимости от конструкции люков и системы выгрузки.

Для расчета количества циклов в год $N_{\text{год}}$ используется формула (4.7):

$$N_{\text{год}} = \frac{T_{\text{год}}}{T_{\text{ц}} * k}, \quad (4.7)$$

где $T_{\text{год}}$ — годовой фонд времени, ч,

k — коэффициент эксплуатационной неравномерности (учитывает простои, непогоду, нештатные ситуации, принимается в диапазоне 0,85–0,9).

Зная годовую производительность $Q_{\text{год}}$ и количество циклов, определяют массу ЖМК, поднимаемую в одном цикле, по формуле (4.8):

$$m_{\text{ц}} = \frac{Q_{\text{год}}}{N_{\text{год}}}, \quad (4.8)$$

При известной грузоподъёмности одной промежуточной капсулы $m_{\text{капс}}$, определяется минимальное количество капсул, необходимое для обеспечения непрерывной работы комплекса, по формуле (4.9):

$$n_{\text{капс}} = \frac{m_{\text{ц}}}{m_{\text{капс}}}, \quad (4.9)$$

С учётом логистики, когда одна капсула находится в пути, вторая погружается, а третья выгружается и готовится к следующему циклу, практическая организация работы требует, как минимум трёх капсул на один подъемный пост. Таким образом, количество капсул умножается на поправочный коэффициент логистического резерва, составляющий от 1,5 до 2,0.

Количество судов, необходимых для обслуживания циклично-поточной схемы, определяется из условия покрытия всей площади сбора и обеспечения необходимой частоты циклов. Принимая размер одного участка сбора 700×700 м и плотность распределения ЖМК в пределах 12 кг/м^3 , рассчитывается объём ресурса на квадрат и количество квадратов, необходимое для заданной производительности. При этом, если цикл погрузки-выгрузки и подготовки занимает 2,5–3 часа, то каждый комплекс может выполнять до 8–9 циклов в сутки. Соответственно, определяется количество необходимых судов (или судо-капсульных комплексов) по формуле (4.10):

$$n_{\text{судов}} = \frac{Q_{\text{год}}}{(n_{\text{капс}} * m_{\text{капс}} * N_{\text{дн}} * \eta)}, \quad (4.10)$$

где $N_{\text{дн}}$ — количество дней работы в году, дней,

η — коэффициент использования времени (обычно 0,8–0,9).

Проведённые расчёты показывают, что при производительности 2,5 млн

т/год и грузоподъёмности капсулы 50 т потребуется не менее 17–20 капсул, и от 6 до 8 судов, способных обеспечивать непрерывный цикл подъема и разгрузки. При увеличении плотности месторождения (до 20–40 кг/м³), количество необходимых циклов и судов уменьшается, что повышает эффективность комплекса.

Таким образом, методика определения количества требуемых судов при использовании промежуточной капсулы опирается на анализ цикличности технологических операций, параметров капсулы, глубины погружения, плотности залежей и технических характеристик судна-носителя. В результате формируется оптимальная конфигурация системы, минимизирующая как капиталовложения, так и эксплуатационные затраты, при условии соблюдения заданных объемов добычи и логистических ограничений.

4.3 Экономическая оценка комплекса.

Уникальные твердые полезные ископаемые морского дна залегают преимущественно во всех водах Мирового Океана. Глубина залегания колеблется от 40 до 6000 метров, однако существует определенная корреляция, между глубиной и их ценностью. Так, к примеру ЖМК, залегающие в Финском заливе легко собираемые, залегающие на глубине до 40 м., однако ценности они не представляют, в виду низкого содержания полезных компонентов. В то же время конкреции залегающие в Российском Разведочном Районе (РРР) в провинции Кларион-Клиппертон, Тихий океан, оцениваются в 1562 \$ за тонну сухой массы, по данным на октябрь 2023 года. Горно-геологические условия всех глубоководных ТПИ варьируются от ровных плащеобразных залежей до переменчивых концентрационных образований с резкими впадинами и трещинами. Глубина залегания от 1500 до 4800 метров. Температура окружающей среды также сильно варьируется от 3 °С до 400 °С. Принимая во внимание наличие возмущений среды, таких как подводные течения, галоклины, волны разработка подобного рода месторождений представляется как весьма сложная задача. Содержание полезных ископаемых к каждому рассматриваемому типу ТПИ приведено в таблице 4.1 [24, 90].

Таблица 4.1 – Содержание полезных ископаемых в уникальных глубоководных месторождениях

ТПИ	Ni, %	Cu, %	Co, %	Mn, %	Pt, %	Mo, %	Pb, %	Au, г/т	Ag, г/т	Zn, %
ЖМК	0,46- 1,42	0,12- 1,18	0,20- 0,73	20,0- 36,05	0,2- 1,83	0,04- 0,06	-	-	-	-
КМК	0,5	-	0,60	20,0- 22,0	0,07- 0,14	0,05	-	0,12- 0,88	-	-
ГПС	-	2,61	-	-	-	-	0,18	0,68- 10,4	36,0- 164	7,82

Тем не менее, заключенные с МОМД соглашения, обязывают Российскую Федерацию начать добычу ТПИ в течении ближайших 15 лет. Причем необходимо соблюдать следующие условия в соответствии с Конвенцией: годовая производительность комплекса должна составлять 3,0 млн. тонн в год; срок разработки комплекса от вскрытия до консервации – 20 лет. Таким образом при максимально возможных показателях прибыль составляет 93,7 \$ млрд. В этой связи, полная стоимость двадцатилетнего комплекса не должна превышать данную сумму для обеспечения экономической рентабельности проекта [24].

Принимая во внимание актуальные цены на создание добычных комплексов, а также информацию опрошенных экспертов из различных компаний, таблица расходов будет выглядеть следующим образом (таблица 4.2):

Таблица 4.2 – Таблица расходов при строительстве добычного глубоководного комплекса

Статья расходов	Капитальные расходы	Операционные расходы на 20 лет эксплуатации	Итого
Горнодобывающая система	\$550 млн	\$100 млн/год x 20 лет = \$2 млрд	\$2.55 млрд
Перемещение руды	\$600 млн	\$150 млн/год x 20 лет = \$3 млрд	\$3.6 млрд
Завод по переработке	\$750 млн	\$250 млн/год x 20 лет = \$5 млрд	\$5.75 млрд
Итого	\$1.9 млрд	\$ 10 млрд	\$11.9 млрд

Предположительные затраты на формирование добычного комплекса оцениваются в 12 млрд. \$, с учетом операционных расходов, однако учитывая специфику работ, необходимо проведение множества научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в связи с чем конечные затраты могут увеличиться.

Сравним капитальные затраты и получаемую прибыль при стабильной конъюнктуре рынка, составив таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Ориентировочная оценка залежей глубоководных твердых полезных ископаемых

Тип твердого полезного ископаемого	Стоимость одной тонны сухого ПИ	Выручка при годовой производительности в 2 млн. тонн	Срок окупаемости	Прибыль за 20 лет
ЖМК	\$1562	\$3.124 млрд	8.5 лет	\$37.3 млрд
ГПС	\$429	\$0.858 млрд	18,1 лет	\$1.61 млрд
КМК	\$996	\$1.992 млрд	10,2 лет	\$19,47 млрд

Таким образом, задавая 4 года в качестве срока для создания добычного комплекса, получим следующий график (рисунок 4.4):

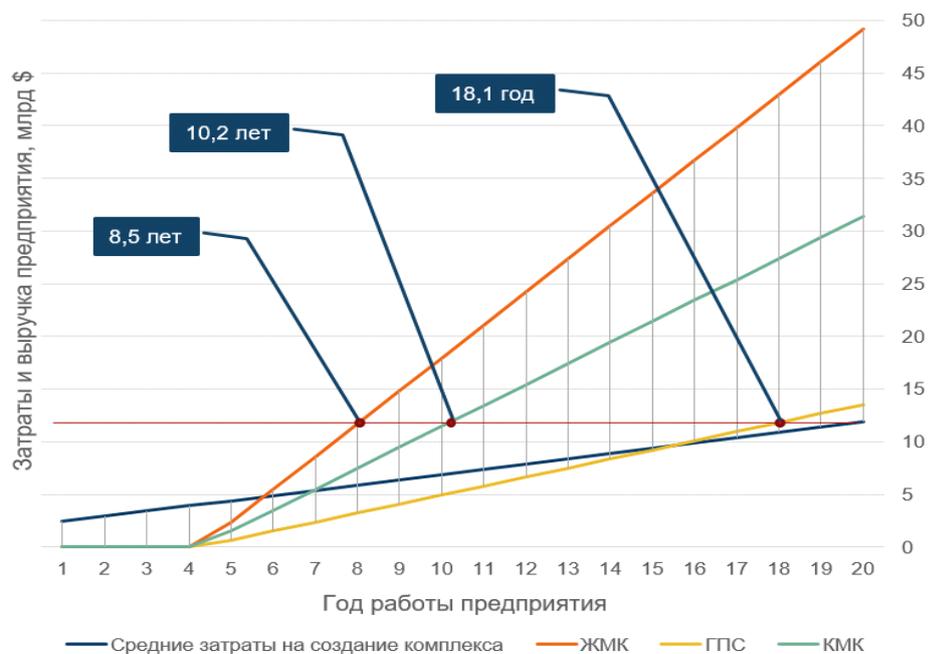


Рисунок 4.4 – Срок окупаемости и выручка при добыче различных уникальных твердых полезных ископаемых

Динамика развития цен на металлы неоднозначна и, к сожалению, не дает возможности прогнозировать прибыль с достаточной точностью. Те же цены, представленные на сегодняшний день окупаемость производства при добыче ЖМК, КМК и ГПС составит 8, 10 и 18 лет соответственно. Предполагается что строительство комплекса займет 4 года, однако такой срок предполагает предварительную тщательную проработку вопросов надежности и производственных рисков.

4.4 Производственные риски реализации комплекса

Любое производство связано с рисками, возникающими по тем или иным причинам. Глубоководный добычный комплекс не исключение и ввиду отсутствия опыта строительства таких предприятий риски увеличиваются в разы. Причем совокупность осложняющих факторов создает трудно контролируемые и плохо управляемые вероятности.

Проведя опрос среди экспертов «Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II» а также представителей различных компаний («ГИКО», «РусГазШельф», «Газпром Инвест» и пр.) была составлена карта рисков при обустройстве месторождений глубоководных ТПИ (рисунок 4.5).

Основные рассматриваемые риски отображены в таблице 4.4.

Карта рисков вероятность/ущерб						
Вероятность	5 - Очень высокая					4
	4 - Высокая					
	3 - Средняя				2	6
	2 - Низкая				3	5
	1 - Очень низкая					1
		1 - Незначительный	2 - Низкий	3 - Средний	4 - Высокий	5 - Очень высокий
Ущерб						

- Низкая
- Умеренная
- Высокая
- Очень высокая
- Критическая

Карта рисков вероятность/управляемость						
Вероятность	5 - Очень высокая		4			
	4 - Высокая					
	3 - Средняя		2	6		
	2 - Низкая			5		3
	1 - Очень низкая				1	
		1 - Очень низкая	2 - Низкая	3 - Средний	4 - Высокая	5 - Очень высокая
Управляемость						

- Снижение риска 1 очередь
- Снижение риска 2 очередь
- Снижение риска, если совокупный риск не соответствует предельно допустимому уровню, в противном случае – мониторинг
- Непрерывный мониторинг. Учет уровня риска при принятии решений, в отдельных случаях – снижение риска
- Непрерывный мониторинг

Рисунок 4.5 – Карта рисков при обустройстве месторождений глубоководных твердых полезных ископаемых

Таблица 4.4 – Ориентировочная оценка залежей глубоководных твердых полезных ископаемых

№	Причина	Риск	Последствия	Оценка			Мероприятия по устранению
				Вероятность	Ущерб	Управляемость	
1	Обвал стоимости добываемых металлов. Возросшие затраты как капитальные, так и операционные	Не достижение экономической эффективности и проекта	Убыточность проекта	4	5	4	Регулировка производительности в соответствии с объемами сбыта. В виду высокой стоимости разрабатываемых ТПИ, а также растущей в них потребности рост затрат не существенно отразится на прибыли
2	Новый материал, не имеющий аналогов и как следствие не имеющий надежного способа переработки. Санкции, запрет на экспорт, отсутствие логистики	Отсутствие рынка сбыта продукции	Неполная реализация всего потенциала продукции Увеличение сроков реализации проекта Увеличение бюджета на реализацию проекта	3	4	2	Создание собственного завода по обогащению поднимаемого ТПИ, а также разработка технологии на его переработку. Продажа продукции через третьи страны, а также вовлечение иностранных партнеров для реализации сбыта
3	Отсутствие проверенных способов исследования глубоководного дна. Ошибки при подсчете запасов в виду неоднородности залегания ТПИ	Низкая степень геологической изученности	Ошибки при выборе надлежащей системы разработки. Некорректная оценка концепции предприятия	2	4	5	До разведка интересующих областей с целью подтверждения запасов. Создание подробной карты морского дна, в виду нахождения ТПИ на его поверхности.
4	Отсутствие мирового опыта добычи глубоководных ТПИ. Ошибки при проектировании не позволяющие эффективно использовать оборудование в единой системе	Неэффективный способ разработки	Снижение производственной мощности. Снижение экономической эффективности предприятия. Падение рентабельности проекта	5	5	2	Разработка РКД от начала и до конца Сопровождение производства на каждом этапе, начиная с закупки материалов до ввода в эксплуатацию. Создание программы постепенного тестирования системы на надежность и эффективность

Продолжение таблицы 4.4

№	Причина	Риск	Последствия	Оценка			Мероприятия по устранению
				Вероятность	Ущерб	Управляемость	
5	Непредсказуемое поведение подводных течений, а также возмущения на водной поверхности. Потеря контроля над подводными аппаратами. Скрытые впадины и ямы на морском дне	Обрыв соединения с подводными аппаратами	Нарушения технологической цепочки что приводит к остановке производства и простоем оборудования до устранения неполадок	2	5	3	Проведение надлежащих испытаний на надежность. Закладывание большего коэффициента запаса прочности конструкции. Составление подробной геологической карты
6	Различный минеральный состав глубоководных и поверхностных вод. Нарушение жизнедеятельности придонной флоры и фауны	Ущерб окружающей среде	Штрафы со стороны природоохранной организацией, а также необходимость корректировки технологии	3	5	3	Анализ возможных нарушений, а также создание технологических решений для их предотвращения

В таблице 4.4 представлены основные риски связанные с обустройством предприятия, которые необходимо учитывать при разработке глубоководные месторождения. Выборка производилась на основании независимого опроса группы лиц, имеющих опыт в проектировании и строительстве морских подводных добычных комплексов.

В общей своей сложности риски сводятся к средне вероятным, с высоким ущербом и средней управляемостью. Главными опасностями является отсутствие мирового опыта добычи океанических твердых полезных ископаемых, а также большое количество возмущающих, стихийных факторов. Вследствие чего возникает риск использования энергетически неэффективного способа разработки и подъема, снижение экономической эффективности предприятия, а также риск обрыва транспортного звена, что приведет к нарушению технологической цепочки, простоям и остановки производства до устранения неполадок. Поэтому процесс транспортировки ТПИ со дна до поверхности является уязвимым местом комплекса, так как невозможно осуществить подъем с разрабатываемой глубины традиционным способом. В этой связи необходимо разработать технологию подъема, обеспечивающую высокую производительность по отношению к энергозатратам.

4.5 Выводы по главе 4

Добыча глубоководных твердых полезных ископаемых (ЖМК, КМК, ГПС) является экономически привлекательной при текущих ценах на металлы. Например, окупаемость ЖМК составляет 8,5 лет при годовой производительности 2 млн. тонн, а общий объем прибыли за 20 лет достигает 37,3 \$ млрд. Полная стоимость реализации комплекса с учетом капитальных и операционных затрат оценивается в 11,9 \$ млрд, что соответствует установленным требованиям экономической рентабельности.

Главные риски связаны с отсутствием мирового опыта добычи глубоководных ТПИ, высокой степенью неопределенности геологических условий и сложностью технологий подъема руды с больших глубин. Существует риск

изменения цен на добываемые металлы, что может привести к снижению экономической эффективности проекта. Влияние на окружающую среду, включая деградацию придонной экосистемы, может вызвать штрафы и требовать коррекции технологий.

Основные нагрузки на капсулу включают гидростатическое давление, динамические воздействия и усталостные нагрузки. На глубине 1000 метров давление достигает 10 МПа, что требует толщины стенок капсулы около 144 мм при использовании стали AISI 301. Компьютерное моделирование выявило превышение допустимых упругих деформаций при расчетных условиях, что требует изменений конструкции. Рекомендуется увеличить толщину стенок, использовать профили с высокой жесткостью или изменить форму капсулы на более обтекаемую (например, каплевидную).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки по снижению энергоёмкости процесса подъёма глубоководных твердых полезных ископаемых (ЖМК) за счёт применения промежуточной капсулы с атмосферным воздухом и использованием гидравлической энергии водной среды.

Основные научные результаты и выводы:

1. На основе анализа существующих технологий добычи глубоководных ЖМК выявлены основные способы транспортирования конкреций на поверхность: циклический, поточный, эрлифтный и двухстадийный.

2. Обоснована целесообразность применения двухстадийного способа подъёма ЖМК, при котором часть пути конкреции преодолевают до промежуточной капсулы без дополнительного силового оборудования, используя энергию гидростатического давления, а оставшаяся часть высоты преодолевается за счёт лебёточно-тросовой системы, при этом энергозатраты на спускоподъемные операции снижаются не менее чем на 18 % по сравнению с традиционными методами транспортирования.

3. Рациональными параметрами промежуточной капсулы для работы на глубине 3500 метров являются цилиндрическая форма с торцевыми полусферами с коэффициентом формы 0,6, длиной оси капсулы 27,7 метров и толщиной стенки более 0,91 метров.

4. Экспериментально оценено влияние формы цилиндрической капсулы на ее гидродинамическое сопротивление и установлено, что при значении коэффициента формы капсулы около 0,6 достигается наименьшее значение коэффициента сопротивления, что позволяет снизить энергозатраты процесса транспортирования не менее чем на 9 % по сравнению с капсулой с коэффициентом формы 0,9.

5. Результаты работ приняты и внедрены в ООО «ГИКО», в том числе приняты методики расчетов и получения экспериментальных данных для создания

опытного образца подводного добычного комплекса.

6. Направлением дальнейшего развития темы исследований может стать изучение и моделирование процессов взаимодействия промежуточной капсулы с морской средой с учетом изменяющихся гидродинамических условий (влияние течений, турбулентности, температурного и солевого градиентов), а также проведение натурных испытаний и масштабирование технологии для промышленного использования.

Полученные в диссертационном исследовании результаты подтверждают возможность организации энергоэффективной добычи глубоководных твердых полезных ископаемых с использованием промежуточной капсулы, работающей на принципах гидростатического давления. Предложенный технологический комплекс и экспериментально обоснованные способы снижения сопротивления при движении оборудования в морской воде расширяют перспективы освоения стратегически важных месторождений ЖМК в условиях больших глубин.

Направлением дальнейшего развития может стать изучение и моделирование процессов взаимодействия промежуточной капсулы с морской средой с учетом изменяющихся гидродинамических условий (влияние течений, турбулентности, температурного и солевого градиентов), а также проведение натурных испытаний и масштабирование технологии для промышленного использования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, В. И. Энергоемкость системы с грунтозаборным устройством для добычи железомарганцевых конкреций с морского дна / Александров В. И., Сержан С. Л. // Sciences of Europe. – 2017. – №. 11-1 (11).
2. Александров, В. И. Удельная энергоемкость гидравлического транспортирования продуктов переработки минерального сырья / Александров В. И., Собота Е. // Записки Горного института. – 2015. – Т. 213. – С. 9–17.
3. Быстров, Е. О. Добывающий агрегат для технологии глубоководного сбора твердых полезных ископаемых / Быстров Е. О., Вершинский А. В., Шубин А. Н. //Механизация строительства. – 2014. – №. 5. – С. 15-16.
4. Добрецов, В.Б. Основные вопросы минеральных ресурсов Мирового океана / Добрецов В.Б., Рогалев В.А. // Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы. 2003. 524 с.
5. Добрецов, В. Б. Освоение минеральных ресурсов шельфа / Добрецов В. Б. – Л. : Недра, 1980. – 272 с.
6. Егоров, И. В. Определение рациональных параметров гидротранспорта твёрдых полезных ископаемых в системе гидроподъёма с подводной станции / Егоров И. В., Жабин А. Б., Поляков А. В. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – Вып. 9.
7. Кириченко, Ю. В. История и перспективы развития глубоководной добычи твёрдых полезных ископаемых / Кириченко Ю. В., Каширский А. С. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №. S11.
8. Кириченко, Ю. В. Месторождения твёрдого минерального сырья Мирового океана и потенциал его использования / Кириченко Ю. В., Каширский А. С. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №. 9.
9. Кириченко, Ю. В. Технология добычи железомарганцевых конкреций с помощью кассетного трала / Кириченко Ю. В., Каширский А. С. // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №. S11.

10. Кириченко, Ю. В. Анализ экологического воздействия разработок подводных месторождений твёрдых полезных ископаемых / Кириченко Ю. В., Каширский А. С., Иващенко Г. С. // Горная промышленность. – 2019. – №. 3 (145).

11. Кисляков, В. Е. Автономное устройство для подъёма полезных ископаемых со дна акватории : пат. № 2539508 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 / Кисляков В. Е., Маликова К. В., Катышев П. В. – Заявл. 21.11.2013 ; опубл. 20.01.2015.

12. Кондратенко, А. В. Физико-механические свойства донных образований на глубоководных месторождениях железомарганцевых конкреций / Кондратенко А. В. // Горный журнал. – 2012. – № 3. – С. 37–41.

13. Котиков, Д. А. Установление связи между распределением сейсмособытий в массиве горных пород и его тектоническим строением / Котиков Д. А., Шабаров А. Н., Цирель С. В. // Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 28–32. – DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05.

14. Лаптева, А. М. Оценка перспектив рационального освоения ресурсов железомарганцевых конкреций дна Мирового океана в контексте эволюции мировых рынков меди, никеля, кобальта и марганца / Лаптева А. М. и др. // Руды и металлы. – 2021. – № 1. – С. 6–25.

15. Маховиков, Б. С. Обоснование параметров гидротурбины для привода механизмов при глубоководной добыче твёрдых полезных ископаемых / Маховиков Б. С., Екимов Н. А. // Записки Горного института. – 2008. – Т. 178.

16. Маховиков, Б. С. Устройство для сбора полезных ископаемых с поверхности морского дна : пат. № 2165021 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 / Маховиков Б. С., Кабанов О. В., Шорников В. В., Братчиков Н. В. – Заявл. 14.09.1999 ; опубл. 10.04.2001.

17. Патент № 2779867 С1 Российская Федерация, МПК E21C 50/00. Промежуточная капсула для подъема твердых полезных ископаемых со дна

мирового океана. Заявка № 2022109841: заявл. 13.04.2022: опубл. 14.09.2022 / С.Л. Сержан, С.А. Лавренко, **Д.В. Малеванный**, Л.М. Дадаян; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» – 14 с

18. Патент № 226407 U1 Российская Федерация, МПК E21C 50/00. Подводный колокол для добычи шельфовых железомарганцевых конкреций. Заявка № 2024105239: заявл. 29.02.2024: опубл. 03.06.2024 / С.Л. Сержан, **Д.В. Малеванный**, Л.М. Дадаян; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» – 11с.

19. Рева, Ю. В. Технические средства добычи минеральных ресурсов и полезных ископаемых из глубин Мирового океана / Рева Ю. В. // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2020. – № 1. – С. 16–19.

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

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611754 Российская Федерация. Программа для определения рациональных геометрических параметров погружной капсулы. Заявка № 2023610573: заявл. 18.01.2023: опубл. 24.01.2023 / С.Л. Сержан, **Д.В. Малеванный**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» – 1 с.

22. Сержан, С. Л. Анализ технических средств для подводной добычи твёрдых полезных ископаемых шельфа и Мирового океана / Сержан С. Л., Вишняков Г. Ю. // Высокие интеллектуальные технологии в науке и образовании. – 2017. – С. 96–99.

23. Сержан, С. Л. Перспективы применения добычного комплекса с

капсулой в условиях добычи шельфовых железомарганцевых конкреций Российской Федерации / Сержан С. Л., **Малеванный Д. В.** // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 4(162). – С. 3–11. – DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-3-11.

24. Сержан, С. Л. Современное состояние и перспективы развития технологий подъёма для комплексов добычи глубоководных твёрдых полезных ископаемых / Сержан С. Л., **Малеванный Д. В.** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12-1. – С. 107–128. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_107.

25. Сержан, С. Л. Технология глубоководной добычи твёрдых полезных ископаемых с применением промежуточной капсулы / Сержан С. Л., **Малеванный Д. В.** // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 2. – С. 49–56. – DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-49-56.

26. Сержан С. Л. Исследование влияния шероховатости стальных и полимерных труб на потери напора при гидротранспорте хвостовой пульпы / С. Л. Сержан, В. И. Скребнев, **Д. В. Малеванный** // Обогащение руд. – 2023. – № 4. – С. 41-49. – DOI 10.17580/or.2023.04.08.

27. Сержан, С. Л. Влияние глубины погружения капсулы с пульпоперекачным оборудованием на эффективность добычи полезного ископаемого морским добычным комплексом / Сержан С. Л., Медведков В. И. // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 3. – С. 34–42.

28. Тарасов, Ю. Д. Комплекс для добычи железомарганцевых конкреций с шельфовой зоны Мирового океана : пат. № 2405110 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 / Тарасов Ю. Д. – Заявл. 2009 ; опубл. 27.11.2010.

29. Тарасов, Ю. Д. Комплекс для добычи конкреций с морского дна : пат. № 2358105 Российская Федерация, МПК E21C 50/00 / Тарасов Ю. Д. – Заявл. 2006 ; опубл. 10.06.2009.

30. Черкашев, Г. А. Международная конференция «Minerals Of The Ocean-7 & Deep-Sea Minerals And Mining-4» / Черкашев Г. А., Голева Р. В. // Разведка и

охрана недр. – 2014. – № 8. – С. 72.

31. Юбко, В. М. Геологоразведочные работы на месторождении железомарганцевых конкреций в зоне Клариян–Клиппертон Тихого океана: история и результаты исследований / Юбко В. М., Пономарева И. Н., Лыгина Т. И. // *Океанологические исследования*. – 2023. – Т. 51. – № 4. – С. 90–134. – DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).5.

32. Юнгмейстер, Д. А. Лабораторные исследования добычного исполнительного органа агрегата сбора железомарганцевых конкреций / Юнгмейстер Д. А., Большунов А. В., Смирнов Д. В. // *Записки Горного института*. – 2008. – Т. 178. – С. 198.

33. Юнгмейстер, Д. А. Обоснование типов глубоководной техники для добычи морских железомарганцевых конкреций / Юнгмейстер Д. А., Судариков С. М., Киреев К. А. // *Записки Горного института*. – 2019. – Т. 235. – С. 88.

34. Baturin, G. N. Distribution of elements in ferromanganese nodules in seas and lakes / G. N. Baturin // *Lithology and Mineral Resources*. – 2019. – Vol. 54. – P. 362–373. – DOI: 10.1134/s002449021905002x.

35. Benites, M. Integrated geochemical and morphological data provide insights into the genesis of ferromanganese nodules / M. Benites, C. Millo, J. Hein et al. // *Minerals*. – 2018. – Vol. 8, № 11. – Article 488. – DOI: 10.3390/min8110488.

36. Chang, Y.-L. Hydrocyclone used for in-situ sand removal of natural gas-hydrate in the subsea / Y.-L. Chang et al. // *Fuel*. – 2021. – Vol. 285. – Article 119075. – DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119075.

37. Chung, J. S. Advance in deep-ocean mining systems research / J. S. Chung, K. Tsurusaki // *Proc. Int. Offshore and Polar Eng. Conf.* – 1994. – Vol. 1. – P. 18–31.

38. Glasby, G. P. Deep seabed mining: Past failures and future prospects / G. P. Glasby // *Marine Georesources and Geotechnology*. – 2002. – Vol. 20, № 2. – P. 161–176. – DOI: 10.1080/03608860290051859.

39. Clark, M. R. The Ecology of Seamounts: Structure, Function, and Human Impacts / M. R. Clark et al. // *Annual Review of Marine Science*. – 2010. – Vol. 2, № 1.

– P. 253–278. – DOI: 10.1146/annurev-marine-120308-081109.

40. Collins, P. C. A primer for the Environmental Impact Assessment of mining at seafloor massive sulfide deposits / P. C. Collins et al. // *Marine Policy*. – 2013. – Vol. 42. – P. 198–209. – DOI: 10.1016/j.marpol.2013.01.020.

41. Crowhurst, P. Exploration and resource drilling of seafloor massive sulfide (SMS) deposits in the Bismarck Sea, Papua New Guinea / P. Crowhurst, J. Lowe // *OCEANS'11 - MTS/IEEE Kona*. – 2011. – Program Book. – DOI: 10.23919/oceans.2011.6107232.

42. de Smet, B. The community structure of deep-sea macrofauna associated with polymetallic nodules in the eastern part of the Clarion-Clipperton Fracture Zone / B. de Smet, E. Pape, T. Riehl, P. Bonifácio, L. Colson, A. Vanreusel // *Frontiers in Marine Science*. – 2017. – Vol. 4 (APR). – DOI: 10.3389/fmars.2017.00103.

43. Ellefmo, S. L. Full cycle resource evaluation of SMS deposits along the Arctic Mid Ocean Ridge / S. L. Ellefmo, M. Ludvigsen, E. K. T. Frimanslund // *Proc. of the Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE*. – 2017. – Vol. 6. – DOI: 10.1115/OMAE2017-62525.

44. Elostá, H. A conceptual framework for assessing the potential of ocean mining sites / H. Elostá, S. Shan, N. L. Kudla, K.-K. Yang // *Proc. of the Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE*. – 2013. – Vol. 5. – DOI: 10.1115/OMAE2013-10539.

45. Ericsson, M. Seabed deposits generate a new wave of interest in offshore mineral recovery / M. Ericsson // *Engineering and Mining Journal*. – 2008. – Vol. 209, № 7. – P. 120–125.

46. Fairley, P. Robot miners of the briny deep: Nautilus Minerals will test machines that will dig for gold in deep-sea vents / P. Fairley // *IEEE Spectrum*. – 2016. – Vol. 53, № 1. – P. 44–47. – DOI: 10.1109/MSPEC.2016.7367465.

47. Fard, R. N. Power system design considerations for a seafloor mining vehicle / R. N. Fard, E. Tedeschi // *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2018)*. – 2018. – P. 1164–1171. – DOI: 10.1109/ECCE.2018.8558004.

48. Fard, R. N. Investigation of AC and DC power distributions to seafloor mining equipment / R. N. Fard, E. Tedeschi // OCEANS 2017 – Aberdeen. – 2017. – October. – P. 1–7. – DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084903.
49. Fard, R. N. Cable selection considerations for subsea vehicles / R. N. Fard, O.-A. Eidsvik, E. Tedeschi, I. Schølberg // OCEANS – Kobe 2018, MTS/IEEE. – 2018. – DOI: 10.1109/OCEANSKOB.2018.8559225.
50. Giurco, D. Mining and sustainability: Asking the right questions / D. Giurco, C. Cooper // Minerals Engineering. – 2012. – Vol. 29. – P. 3–12. – DOI: 10.1016/j.mineng.2012.01.006.
51. Glasby, G. P. Deep seabed mining: Past failures and future prospects / G. P. Glasby // Marine Georesources and Geotechnology. – 2002. – Vol. 20, № 2. – P. 161–176. – DOI: 10.1080/03608860290051859.
52. Glover, A. G. The deep-sea floor ecosystem: Current status and prospects of anthropogenic change by the year 2025 / A. G. Glover, C. R. Smith // Environmental Conservation. – 2003. – Vol. 30, № 3. – P. 219–241. – DOI: 10.1017/S0376892903000225.
53. Guo, Q. Fluid-mechanical interaction simulation and coupling analysis for deep mining of subsea resources / Q. Guo, Q. Chen, S. Miao, X. Xi, Z. Zhang // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Vol. 7, № 6. – P. 281–288.
54. Halbach, P. The manganese nodule belt of the Pacific Ocean: geological environment, nodule formation and mining aspects / P. Halbach, G. Friedrich, U. von Stackelberg. – Stuttgart : Ferdinand Enke Verlag, 1988. – x + 254 p. – ISBN: 3-432-96381-5. – DOI: 10.1017/S0016756800014394.
55. Halbach, P. E. Marine Co-rich ferromanganese crust deposits: Description and formation, occurrences and distribution, estimated world-wide resources / P. E. Halbach, A. Jahn, G. Cherkashov // In: Deep-Sea Mining: Resource Potential, Technical and Environmental Considerations. – 2017. – DOI: 10.1007/978-3-319-52557-0_3.
56. Hein, J. R. Seamount characteristics and mine-site model applied to exploration- and mining-lease-block selection for cobalt-rich ferromanganese crusts / J.

R. Hein, T. A. Conrad, R. E. Dunham // *Marine Georesources and Geotechnology*. – 2009. – Vol. 27, № 2. – P. 160–176. – DOI: 10.1080/10641190902852485.

57. Hein, J. R. Arctic deep water ferromanganese-oxide deposits reflect the unique characteristics of the Arctic Ocean / J. R. Hein et al. // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2017. – Vol. 18, № 11. – P. 3771–3800. – DOI: 10.1002/2017GC007186.

58. Hu, Q. Development of hydraulic lifting system of deep-sea mineral resources / Q. Hu, Z. Li, X. Zhai, H. Zheng // *Minerals*. – 2022. – Vol. 12. – Article 1319. – DOI: 10.3390/min12101319.

59. Itiki, R. Methodology for mapping operational zones of VSC-HVDC transmission system on offshore ports / R. Itiki, S. G. di Santo, E. C. M. Costa, R. M. Monaro // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. – 2017. – Vol. 93. – P. 266–275. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.05.034.

60. Jahanshahi, E. Anti-slug control based on a virtual flow measurement / E. Jahanshahi, C. J. Backi, S. Skogestad // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2017. – Vol. 53. – P. 299–307. – DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2017.01.008.

61. Volz, J. B. Alpha radiation from polymetallic nodules and potential health risks from deep-sea mining / J. B. Volz, W. Geibert, D. Köhler, M. M. Rutgers van der Loeff, S. Kasten // *Scientific Reports*. – 2023. – Article 7985. – DOI: 10.1038/s41598-023-33971-w.

62. Josso, P. A new discrimination scheme for oceanic ferromanganese deposits using high field strength and rare earth elements / P. Josso, E. Pelleter, O. Pourret, Y. Fouquet, J. Etoubleau, S. Cheron, C. Bollinger // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – Vol. 87. – P. 3–15. – DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.09.003.

63. Kang, H.-S. Underwater target tracking of offshore crane system in subsea operations / H.-S. Kang, Y.-T. Wu, L. K. Quen, C. H.-H. Tang, C.-L. Siow // In: *Communications in Computer and Information Science*. – 2017. – Vol. 752. – DOI: 10.1007/978-981-10-6502-6_11.

64. Knodt, S. Development and engineering of offshore mining systems – State of the art and future perspectives / S. Knodt, T. Kleinen, C. Dornieden, J. Lorscheidt, B.

Bjørneklett, A. Mitzlaff // Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. – 2016. – Vol. 4. – P. 3436–3457. – DOI: 10.4043/27185-ms.

65. Konstantinova, N. Composition and characteristics of the ferromanganese crusts from the western Arctic Ocean / N. Konstantinova, G. Cherkashov, J. R. Hein et al. // Ore Geology Reviews. – 2017. – Vol. 87. – P. 88–99. – DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.09.011.

66. Korolyov, I. A. Technological features of the interaction between a flexible traction element and extracting unit during the development of solid mineral resources of the seabed / I. A. Korolyov, S. A. Lavrenko // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, № 9. – P. 2031–2037.

67. Koschinsky, A. Marine ferromanganese encrustations: Archives of changing oceans / A. Koschinsky, J. R. Hein // Elements. – 2017. – Vol. 13, № 3. – P. 177–182. – DOI: 10.2113/gselements.13.3.177.

68. Lee, C. H. Study of deep-sea mining robot “MineRo” using table of orthogonal arrays / C. H. Lee, H. W. Kim, J. S. Choi et al. // Journal of Ocean Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 28, № 2. – P. 152–159. – DOI: 10.5574/KSOE.2014.28.2.152.

69. Levin, L. A. Hydrothermal vents and methane seeps: Rethinking the sphere of influence / L. A. Levin et al. // Frontiers in Marine Science. – 2016. – Vol. 3 (MAY). – DOI: 10.3389/fmars.2016.00072.

70. Levin, L. A. Macrobenthos community structure and trophic relationships within active and inactive Pacific hydrothermal sediments / L. A. Levin, G. F. Mendoza, T. Konotchick, R. Lee // Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. – 2009. – Vol. 56, № 19–20. – P. 1632–1648. – DOI: 10.1016/j.dsr2.2009.05.010.

71. Li, L. Research of China’s pilot-miner in the mining system of poly-metallic nodule / L. Li, J. Zhong // Proceedings of the ISOPE Ocean Mining Symposium. – 2005. – P. 124–131.

72. Li, X. Determination of the minimum thickness of crown pillar for safe exploitation of a subsea gold mine based on numerical modelling / X. Li, D. Li, Z. Liu,

G. Zhao, W. Wang // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2013. – Vol. 57. – P. 42–56. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.08.005.

73. Li, X. Theory and practice of rock mechanics related to exploitation of undersea metal mine / X. Li, Z. Liu, K. Peng, G. Zhao, S. Peng // *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. – 2010. – Vol. 29, № 10. – P. 1945–1953.

74. Liang, W.-Z. Optimization of mining method in subsea deep gold mines: A case study / W.-Z. Liang, G.-Y. Zhao, H. Wu, Y. Chen // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. – 2019. – Vol. 29, № 10. – P. 2160–2169. – DOI: 10.1016/S1003-6326(19)65122-8.

75. Liu, S. Development of mining technology and equipment for seafloor massive sulfide deposits / S. Liu, J. Hu, R. Zhang, Y. Dai, H. Yang // *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*. – 2016. – Vol. 29, № 5. – P. 863–870. – DOI: 10.3901/CJME.2016.0815.093.

76. Ludvigsen, M. Towards integrated autonomous underwater operations for ocean mapping and monitoring / M. Ludvigsen, A. J. Sørensen // *Annual Reviews in Control*. – 2016. – Vol. 42. – P. 145–157. – DOI: 10.1016/j.arcontrol.2016.09.013.

77. Lusty, P. A. J. Deep-ocean mineral deposits: Metal resources and windows into earth processes / P. A. J. Lusty, B. J. Murton // *Elements*. – 2018. – Vol. 14, № 5. – P. 301–306. – DOI: 10.2138/gselements.14.5.301.

78. Marino, E. Strategic and rare elements in Cretaceous–Cenozoic cobalt-rich ferromanganese crusts from seamounts in the Canary Island Seamount Province (northeastern tropical Atlantic) / E. Marino et al. // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – Vol. 87. – P. 41–61. – DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.10.005.

79. Masanobu, S. Study on hydraulic transport of large solid particles in inclined pipes for subsea mining / S. Masanobu et al. // *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. – 2017. – Vol. 139, № 5. – DOI: 10.1115/1.4050593.

80. Masanobu, S. Pressure loss due to hydraulic transport of large solid particles in vertical pipes under pulsating flow conditions / S. Masanobu, S. Takano, S. Kanada, M. Ono // *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. – 2021. – Vol. 143, №

6. – DOI: 10.1115/1.4036385.

81. Menendez, A. Controls on the chemical composition of ferromanganese nodules in the Clarion-Clipperton Fracture Zone, eastern equatorial Pacific / A. Menendez et al. // *Marine Geology*. – 2019. – Vol. 409. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/j.margeo.2018.12.004.

82. Miller, K. A. An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps / K. A. Miller, K. F. Thompson, P. Johnston, D. Santillo // *Frontiers in Marine Science*. – 2018. – Vol. 4 (JAN). – DOI: 10.3389/fmars.2017.00418.

83. Morgan, C. L. Synthesis of environmental impacts of deep seabed mining / C. L. Morgan // *Marine Georesources and Geotechnology*. – 1999. – Vol. 17, № 4. – P. 307–356. – DOI: 10.1080/106411999273666.

84. Nishi, K. Formation age of the dual structure and environmental change recorded in hydrogenetic ferromanganese crusts from Northwest and Central Pacific seamounts / K. Nishi, A. Usui, Y. Nakasato, H. Yasuda // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – Vol. 87. – P. 62–70. – DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.09.004.

85. Okamoto, N. Current status of Japan's activities for deep-sea commercial mining campaign / N. Okamoto, S. Shiokawa, S. Kawano, H. Sakurai, N. Yamaji, M. Kurihara // 2018 OCEANS – MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). – IEEE, 2018. – P. 1–7. – DOI: 10.1109/OCEANSKOB.2018.8559373.

86. Orcutt, B. N. Impacts of deep-sea mining on microbial ecosystem services / B. N. Orcutt et al. // *Limnology and Oceanography*. – 2020. – Vol. 65, № 7. – P. 1489–1510. – DOI: 10.1002/lno.11403.

87. Peng, K. Safe mining technology of undersea metal mine / K. Peng, X.-B. Li, C.-C. Wan, S.-Q. Peng, G.-Y. Zhao // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. – 2012. – Vol. 22, № 3. – P. 740–746. – DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61239-9.

88. Peng, K. Determination of isolation layer thickness for undersea mine based on differential cubature solution to irregular Mindlin plate / K. Peng, Z.-P. Liu, Y.-L.

Zhang, X. Fan, Q.-F. Chen // *Journal of Central South University*. – 2017. – Vol. 24, № 3. – P. 708–719. – DOI: 10.1007/s11771-017-3472-2.

89. Petrochenkov, D. A. Jewelry-quality modiroval ammonite, Madagascar / D. A. Petrochenkov // *Mining Informational and Analytical Bulletin*. – 2018. – № 7. – P. 160–168. – DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-160-168.

90. Peukert, A. Understanding Mn-nodule distribution and evaluation of related deep-sea mining impacts using AUV-based hydroacoustic and optical data / A. Peukert et al. // *Biogeosciences*. – 2018. – Vol. 15, № 8. – P. 2525–2549. – DOI: 10.5194/bg-15-2525-2018.

91. Popov, A. M. Matrix effects on laser-induced plasma parameters for soils and ores / A. M. Popov, S. M. Zaytsev, I. V. Seliverstova, A. S. Zakuskin, T. A. Labutin // *Spectrochimica Acta – Part B: Atomic Spectroscopy*. – 2018. – Vol. 148. – P. 205–210. – DOI: 10.1016/j.sab.2018.07.005.

92. Ramirez-Llodra, E. Deep, diverse and definitely different: Unique attributes of the world's largest ecosystem / E. Ramirez-Llodra et al. // *Biogeosciences*. – 2010. – Vol. 7, № 9. – P. 2851–2899. – DOI: 10.5194/bg-7-2851-2010.

93. Ramirez-Llodra, E. Man and the last great wilderness: Human impact on the deep sea / E. Ramirez-Llodra et al. // *PLoS ONE*. – 2011. – Vol. 6, № 8. – Article e22588. – DOI: 10.1371/journal.pone.0022588.

94. Rothwell, R. G. New techniques in sediment core analysis: An introduction / R. G. Rothwell, F. R. Rack // *Geological Society Special Publication*. – 2006. – Vol. 267. – DOI: 10.1144/GSL.SP.2006.267.01.01.

95. Rühlemann, C. Current status of manganese nodule exploration in the German license area / C. Rühlemann et al. // *Proceedings of the ISOPE Ocean Mining Symposium*. – 2011. – P. 168–173.

96. Schneider, D. Deep-sea mining stirs up muddy questions: A controversial pilot program will collect metal-rich nodules from the ocean floor / D. Schneider // *IEEE Spectrum*. – 2022. – Vol. 59, № 1. – P. 56–57. – DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.07.007.

97. Schlanbusch, R. Condition monitoring technologies for steel wire ropes – A

review / R. Schlanbusch, E. Oland, E. R. Bechhoefer // *International Journal of Prognostics and Health Management*. – 2017. – Vol. 8, № 1.

98. 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. – Vol. 150. – P. 924–929. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.063.

99. Søreide, F. Deep ocean mining reconsidered: A study of the manganese nodule deposits in Cook Island / F. Søreide, T. Lund, J. M. Markussen // *Proceedings of the ISOPE Ocean Mining Symposium*. – 2001. – P. 88–93.

100. Tang, Y. C. Experimental study on rock fragmentation of underwater blasting / Y. C. Tang, W. D. Duan, Z. L. Qiao, P. Jiang, H. C. Hu // *Blasting*. – 2016. – Vol. 33. – P. 102–106. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104797.

101. Trueblood, D. D. Benthic Impact Experiment: A study of the ecological impacts of deep seabed mining on abyssal benthic communities / D. D. Trueblood, E. Ozturgut // *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. – 1997. – Vol. 1. – P. 481–487.

102. Usui, A. Continuous growth of hydrogenetic ferromanganese crusts since 17 Myr ago on Takuyo-Daigo Seamount, NW Pacific, at water depths of 800–5500 m / A. Usui et al. // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – Vol. 87. – P. 71–87. – DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.09.032.

103. Viswanathan, S. Preliminary design through analysis of a bottom weighted rigid riser for subsea mining / S. Viswanathan, R. P. Selvam, D. C. Raphael // *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE*. – 2014. – Vol. 6B. – DOI: 10.1115/OMAE2014-24327.

104. Wang, S. Shear behaviour of a rock bridge sandwiched between incipient joints under the influence of hydraulic pressures / S. Wang, X. Yang, L. Li, P. Sun, L. Yang, F. Li // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2023. – Vol. 33, № 2. – P. 233–242. – DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.10.007.

105. Williams, D. P. Exploiting environmental information for improved

underwater target classification in sonar imagery / D. P. Williams, E. Fakiris // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2014. – Vol. 52, № 10. – P. 6284–6297. – DOI: 10.1109/TGRS.2013.2295843.

106. Xiao, Y. Distribution of marine mineral resource and advances of deep-sea lifting pump technology / Y. Xiao, L. Yang, L. Cao, Z. Wang // Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering. – 2014. – Vol. 32, № 4. – P. 319–326. – DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.13.1064.

107. Yamamoto, M. A model experiment of a Free Standing Riser in the Deep-Sea Basin / M. Yamamoto, S. Masanobu, S. Takano, S. Kanada, T. Fujiwara, T. Asanuma // Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE. – 2013. – Vol. 4A. – DOI: 10.1115/OMAE2013-10577.

108. Yamazaki, T. Approaches for environmental impact assessment of Seafloor Massive Sulfide mining / T. Yamazaki // Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE. – 2011. – Vol. 5. – P. 45–51. – DOI: 10.1115/OMAE2011-49453.

109. Yungmeister, D. Development of the construction and characterization of deep complex for collecting IMC / D. Yungmeister, K. Kireev // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – Vol. 7, № 2. – P. 2086–2091.

110. Liu, Z. Deep-sea rock mechanics and mining technology: State of the art and perspectives / Z. Liu et al. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2023. – P. 1083–1115. – DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.07.007.

111. Zhu, X. Dynamic analysis of vessel/riser/equipment system for deep-sea mining with RBF neural network approximations / X. Zhu, L. Sun, B. Li // Marine Georesources and Geotechnology. – 2020. – Vol. 38, № 2. – P. 174–192. – DOI: 10.1080/1064119X.2018.1564407.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов исследования

Утверждаю
 Генеральный директор ООО «ГИКО»
 Григорчук А.В.

Дата: 10 апреля 2025 г.



АКТ
 о внедрении результатов
 кандидатской диссертации
Малеванного Дмитрия Владимировича
 по научной специальности 2.8.8. «Геотехнология, горные машины»

Рабочая комиссия в составе:

Председатель – Литовко С.С.

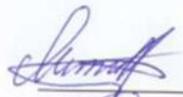
Члены комиссии: Афанасьев А.А., Кравец А.Н.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование и выбор критериев и технологических требований к транспортировке и подъему ЖМК с морского дна», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, приняты к использованию в деятельности ООО «ГИКО» при разработке опытного образца комплекса для глубоководной добычи ЖМК в виде технического предложения по формированию циклично-поточной системы подъема ЖМК с морского дна, включающую промежуточную капсулу и спуско-подъемное оборудование, позволяющую снизить энергоемкость процесса подъема твердого полезного ископаемого за счет использования в качестве источника энергии гидростатического давления, определяемого глубиной расположения промежуточной капсулы и ее геометрическими параметрами.

Циклично-поточная системы подъема наиболее эффективна при разработке глубоководных месторождений железомарганцевых конкреций с глубин более 4000 метров, а предложенная методика определения формы промежуточной капсулы для достижения наименьших удельных энергозатрат, позволяет определить наиболее рациональные параметры и требования в соответствии с рассматриваемыми горно-геологическими условиями, для формирования устойчивого и энергетически стабильного подводного добычного комплекса.

Председатель комиссии

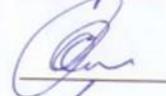
Зам. генерального директора



Литовко С.С.

Члены комиссии:

Главный конструктор



Афанасьев А.А.

Ведущий инженер



Кравец А.Н.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2779867

**ПРОМЕЖУТОЧНАЯ КАПСУЛА ДЛЯ ПОДЪЕМА
ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ СО ДНА
МИРОВОГО ОКЕАНА**

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

Авторы: *Сержан Сергей Леонидович (RU), Лавренко Сергей Александрович (RU), Малеванный Дмитрий Владимирович (RU), Дадаян Лаврентий Маратович (RU)*

Заявка № 2022109841

Приоритет изобретения 13 апреля 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 14 сентября 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 13 апреля 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 226407**ПОДВОДНЫЙ КОЛОКОЛ ДЛЯ ДОБЫЧИ
ШЕЛЬФОВЫХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ
КОНКРЕЦИЙ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)*

Авторы: *Сержан Сергей Леонидович (RU), Малеванный Дмитрий Владимирович (RU), Дадаян Лаврентий Маратович (RU)*

Заявка № 2024105239

Приоритет полезной модели **29 февраля 2024 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **03 июня 2024 г.**

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **28 февраля 2034 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023611754

**Программа для определения рациональных
геометрических параметров погружной капсулы**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Сержан Сергей Леонидович (RU), Малеванный
Дмитрий Владимирович (RU)*

Заявка № 2023610573

Дата поступления 18 января 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 января 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Handwritten signature of Yu.S. Zubov in black ink.

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Результаты эксперимента

Таблица Д.1 – Результат серии эксперимента 1 (плотность 1200 кг/м³)

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
1	4,260	0,7	0,1643	0,1656	0,386
2	4,264		0,1642		
3	4,222		0,1658		
4	4,186		0,1672		
5	4,186		0,1672		
6	4,256		0,1645		
7	4,188		0,1671		
8	4,263		0,1642		
9	4,174		0,1677		
10	4,268		0,1640		

Таблица Д.2 – Результат серии эксперимента 2 (плотность 1220 кг/м³)

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
1	4,011	0,7	0,1745	0,1739	0,377
2	3,999		0,1750		
3	3,999		0,1750		
4	4,027		0,1738		
5	4,075		0,1718		
6	4,056		0,1726		
7	4,041		0,1732		
8	3,992		0,1754		
9	4,019		0,1742		
10	4,037		0,1734		

Таблица Д.3 – Результат серии эксперимента 3 (плотность 1240 кг/м³)

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
1	3,670	0,7	0,1907	0,1935	0,381
2	3,684		0,1900		
3	3,596		0,1947		
4	3,578		0,1956		
5	3,603		0,1943		
6	3,602		0,1943		

Продолжение таблицы Д.3

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
7	3,591		0,1949		
8	3,598		0,1946		
9	3,586		0,1952		
10	3,668		0,1908		

Таблица Д.4 – Результат серии эксперимента 4 (плотность 1260 кг/м³)

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
1	3,361		0,2083		
2	3,319		0,2109		
3	3,286		0,2130		
4	3,33		0,2102		
5	3,367	0,7	0,2079	0,2094	0,384
6	3,388		0,2066		
7	3,304		0,2119		
8	3,335		0,2099		
9	3,375		0,2074		
10	3,363		0,2081		

Таблица Д.5 – Результат серии эксперимента 5 (плотность 1280 кг/м³)

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
1	2,987		0,2343		
2	3,026		0,2313		
3	3,042		0,2301		
4	3,023		0,2316		
5	2,958	0,7	0,2366	0,2332	0,379
6	2,945		0,2377		
7	3,01		0,2326		
8	3,042		0,2301		
9	2,971		0,2356		
10	3,011		0,2325		

Таблица Д.6 – Результат серии эксперимента 7 (плотность 1320 кг/м³)

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
1	2,147	0,7	0,3260	0,3252	0,388

Продолжение таблицы Д.6

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
2	2,211		0,3166		
3	2,197		0,3186		
4	2,129		0,3288		
5	2,191		0,3195		
6	2,137		0,3276		
7	2,133		0,3282		
8	2,105		0,3325		
9	2,108		0,3321		
10	2,17		0,3226		

Таблица Д.7 – Результат серии эксперимента 8 (плотность 1340 кг/м³)

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
1	2,050		0,3415		
2	1,959		0,3573		
3	1,961		0,3570		
4	1,999		0,3502		
5	1,934		0,3619		
6	1,973	0,7	0,3548	0,3532	0,384
7	2,042		0,3428		
8	1,920		0,3646		
9	2,006		0,3490		
10	1,982		0,3532		

Таблица Д.8 – Результат серии эксперимента 9 (плотность 1360 кг/м³)

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
1	1,762		0,3973		
2	1,759		0,3980		
3	1,776		0,3941		
4	1,754		0,3991		
5	1,777	0,7	0,3939	0,3966	0,381
6	1,718		0,4075		
7	1,800		0,3889		
8	1,791		0,3908		
9	1,729		0,4049		
10	1,786		0,3919		

Таблица Д.9 – Результат серии эксперимента 10 (плотность 1380 кг/м³)

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
1	1,678	0,7	0,4172	0,4110	0,385
2	1,700		0,4118		
3	1,679		0,4169		
4	1,738		0,4028		
5	1,704		0,4108		
6	1,731		0,4044		
7	1,704		0,4108		
8	1,717		0,4077		
9	1,685		0,4154		
10	1,698		0,4122		

Таблица Д.10 – Результат серии эксперимента 11 (плотность 1400 кг/м³)

Номер опыта	Время погружения, с	Глубина погружения, м	Скорость погружения, м/с	Средняя скорость погружения, м/с	Коэффициент сопротивления
1	1,509	0,7	0,4639	0,4699	0,384
2	1,516		0,4617		
3	1,485		0,4714		
4	1,464		0,4781		
5	1,485		0,4714		
6	1,454		0,4814		
7	1,529		0,4578		
8	1,486		0,4711		
9	1,517		0,4614		
10	1,456		0,4808		