

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА КОМПЛЕКСА ПО ДОБЫЧЕ ПРИДОННЫХ ЖМК С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОРОБОТОВ-СБОРЩИКОВ

Юнгмейстер Д. А., Ефимов Ф. А., Сержан С.Л., Исаев А. И., Федоров Е.В., Григорчук А.А.

Санкт-Петербургский Горный Университет, Россия

Аннотация

В работе указывается на актуальность задачи по добыча полезных ископаемых со дна мирового океана. В статье проанализированы варианты вертикальных средств транспорта добытого на дне полезного ископаемого. Дано описание конструкции машин, осуществляющих подъем бункера с собранными ЖМК методом тросового подъема. В работе указаны параметры подъемной установки для перемещения собранных на дне ЖМК на поверхность. При использовании арамидных кабель-тросов специального изготовления. Разработка машин на основе указанных в статье компоновок и апробация их экспериментальных конструкций позволит создать уникальный добычный комплекс, способный осуществлять опытную добычу придонных полезных ископаемых на океанических и морских месторождениях.

Введение

Поскольку многие страны испытывают дефицит металлов, Россия вынуждена закупать марганец и полиметаллы за рубежом, а добыча полезных ископаемых с мирового морского дна скоро станет актуальной задачей. Известно, что на глубине от 1,5 до 5 км, называемой мировым дном, находятся миллионы тонн полезных ископаемых. Океанское дно, содержащее уникальные месторождения полиметаллических руд, занимает 40% от общей площади Мирового океана, или более половины всей его поверхности. Благодаря современным геофизическим исследованиями методам отбора проб бентоса российские геологи в настоящее время составляют геологическую карту придонной зоны площадью 30000 кв. км, выделенной для России. Однако если пробная добыча этих запасов не будет начата в соответствии с международными требованиями, то эти участки, скорее всего, будут выставлены на аукцион и перекуплены другими странами. Геологические исследования морского дна показали, что на нем имеются три типа полезных ископаемых.

Известно большое количество конструкций комплексов и средств для добычи КМК/ЖМК [2], однако, многие из них не отвечают повышенным требованиям, особенно по фактору «экологическое воздействие» на придонную флору и фауну. Оригинальные способы добычи предложены на кафедре Машиностроения СПбГУ [3,4] совместно с ООО «ГИКО», которые требуют апробации в условиях моря.

1) Железомарганцевые обломки (ЖМК) (рис. 1). Эти уникальные образования (у геологов до сих пор нет единой теории их образования) являются важнейшим источником металлов, а поверхностные залежи истощаются. Например, в Российской Федерации нет месторождений марганца, и он закупается в других странах в качестве валюты.



Рис. 1. Залегание ЖМК на морском дне

2) Кобальто-марганцевые корки (КМК). Образуются в результате выброса богатой металлами глубоководной лавы на морское дно. В некоторых районах (по данным исследовательских судов РФ) КМК представляет собой руду с очень высоким содержанием металлов, многоступенчатая переработка руды не требуется, и руду можно рассматривать практически как высокосортный материал.

3) Глубоководные полиметаллические сульфиды (DPS). Обычно они располагаются в прибрежных водах активных фонтанов магмы из вулканов. Эти уникальные месторождения представляют собой вертикальные трубки диаметром в несколько метров и высотой в десятки метров.

Опытный образец

Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых, представленный на рисунке 2 [5], является результатом объединения нескольких вышеперечисленных технологий. Он включает в себя судно обеспечения, станцию с подводными шагающими аппаратами (роботами-отбойщиками или роботами-сборщиками, в зависимости от назначения), зарядную станцию для автономных плавающих роботов-сборщиков, бункер для сбора полезных ископаемых. Расчет производительности представленного комплекса зависит от множества факторов: временные затраты на подъем, разгрузку и спуск бункера, перемещение бункера с участка на участок, плотность конкреций на квадратный метр. Временные затраты зависят от геометрических и силовых параметров сборщиков, скорости их передвижения, на что также влияют и внешние факторы: гидродинамические силы, течения, подводные объекты. Комплекс для спуска и подъема оборудования для добычи полезных ископаемых со дна морей поясняется следующими рисунками:

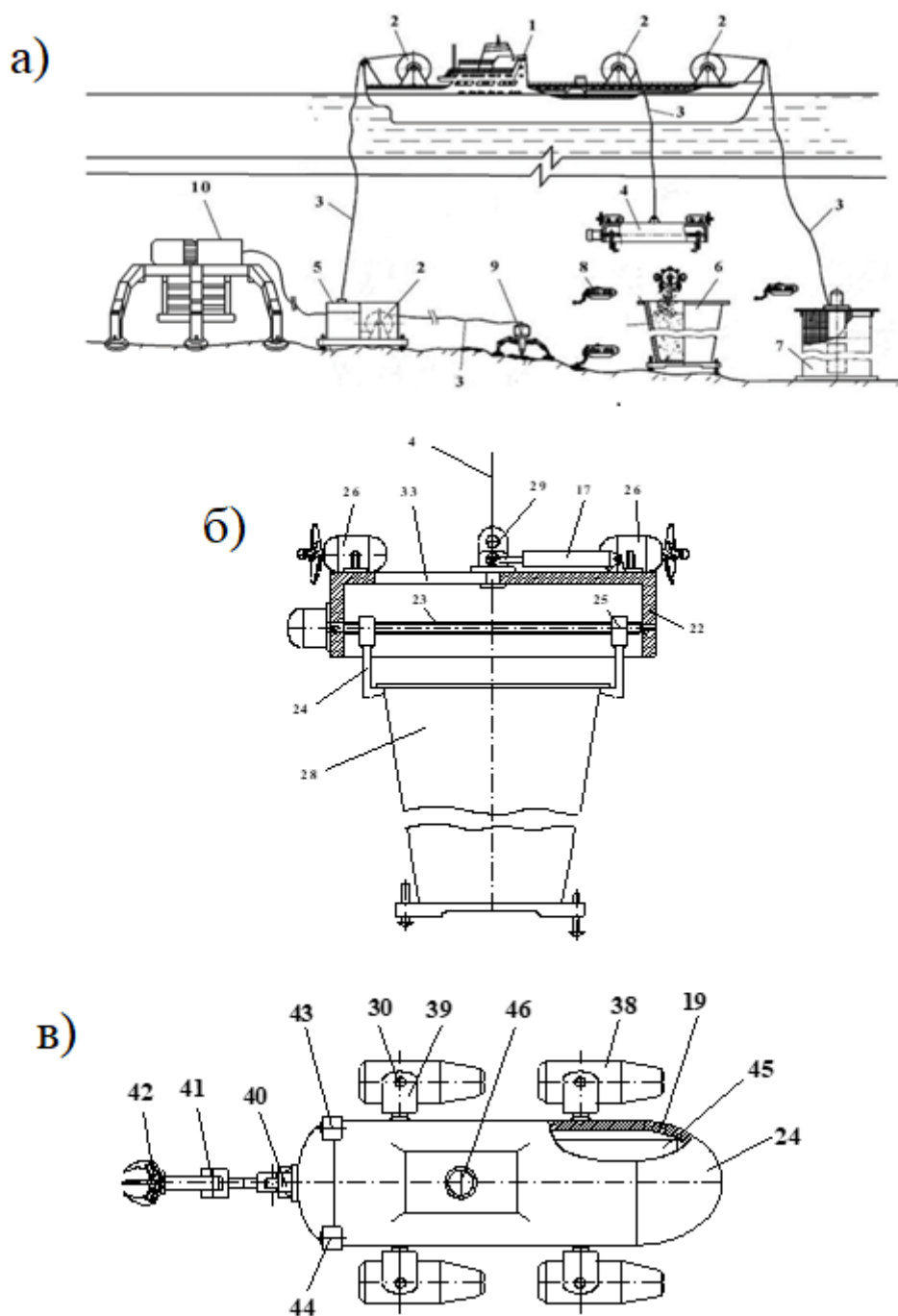


Рис. 2. Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых: а - общий вид комплекса; б - общий вид захватного устройства с бункером-накопителем; в - вид сверху автономного робота-сборщика.

Изобретение относится к области морской добычи. Относится к области горного дела, в частности относится к следующему. Устройство также может быть использовано для спуско-подъемных операций подводного оборудования для добычи полезных ископаемых со дна моря или океана. Аппарат также может быть использован для операций по спуску и подъему подводного оборудования для добычи полезных ископаемых с морского дна.

Комбинированное оборудование включает. Базовое судно, у которого на корме закреплена барабанная лебедка с грузонесущим кабельтроссом, который соединен с захватным устройством. Это захватное устройство выполнено в виде рамы с ходовыми

винтами. На раме также закреплены трансформатор, маслonaсосная станция, разводка кабелей и замковый механизм. Оборудование также включает бункер-накопитель.

Барабанная лебедка оснащена линейно компенсирующим устройством (рис. 3, 4), которое компенсирует колебания от спуско-подъемных операций. Устройство выполнено в виде блока с горизонтальным валом, установленным на корме и вертикальным валом, снабженной кронштейном и в нижней части жестко соединена с кареткой, которая установлена таким образом, чтобы она могла совершать возвратно-поступательные движения на клиновидной направляющей.

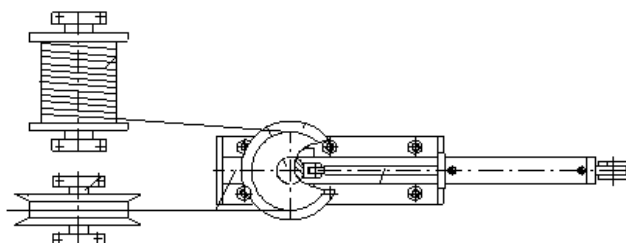


Рис. 3. Устройство линейной компенсации

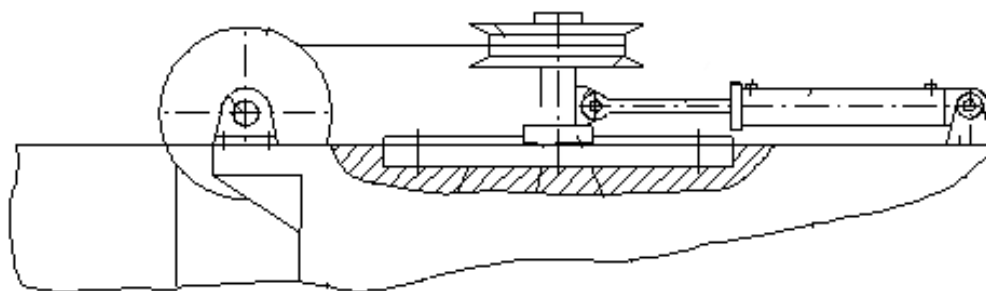


Рис. 4. Устройство линейной компенсации вид сбоку

Кронштейн на вертикальном валу соединен со штоком цилиндра устройства линейной компенсации и обладает системой автоматического управления. Гидравлический цилиндр соединен со стойкой, которая устанавливается на палубе материнского судна.

Запорный механизм включает в себя перфорированную проушину, расположенную на оси симметрии и жестко соединен с цилиндрической цапфой, которая устанавливается в сквозной паз в раме захватного устройства.

На верхней поверхности рамы установлен шток гидроцилиндра захватного устройства и шарнирно соединен с нижним отверстием в проушине. Свободный конец грузонесущего кабель-троса соединен с верхним отверстием в проушине.

Все разрабатываемые конструкции предполагается опробовать на палубе научно-исследовательского судна «Профессор Логачев».

Опираясь на характеристики данного судна, можно сконструировать оборудования для спуско-подъемных операций, которое будет установлено на борту НИС «Профессор Логачев»

Так же, для создания опытного образца требуются данные по вспомогательному оборудованию, а именно, гидравлический портал левого борта для работы с тяжелым подводным оборудованием (рис. 5).



Рис. 5. Портал для работ с подводным оборудованием НИС «Профессор Логачев»

Наиболее важным вспомогательным оборудованием можно считать лебедку для ТВ систем и ТНПА с тяговым усилием 160 кН (рис. 6).



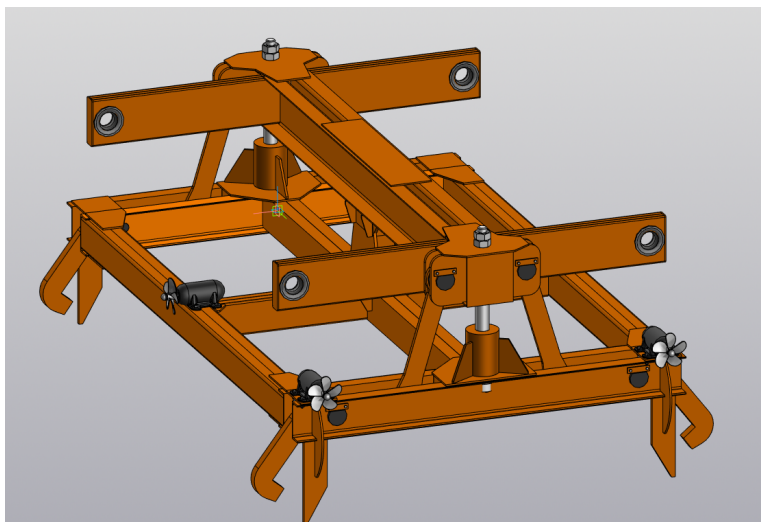
Рис. 6. Лебедка на НИС «Профессор Логачев»

Выбор конструкции рамы спуско-подъемного устройства

Для опытного образца будет использована упрощенная модель, для избегания рысканья устройства при спуско-подъемных операциях.

Целесообразные габариты спускаемого аппарата, включая самонаводящуюся крышку, должны находиться в пределах 3х2х2 (рис. 7).

Поэтому ниже представлена обновленная 3-Д модель для крышки, на которой располагается управляющая гидравлическая аппаратура, крепление кабель троса и разводка гидравлических силовых коммуникаций.



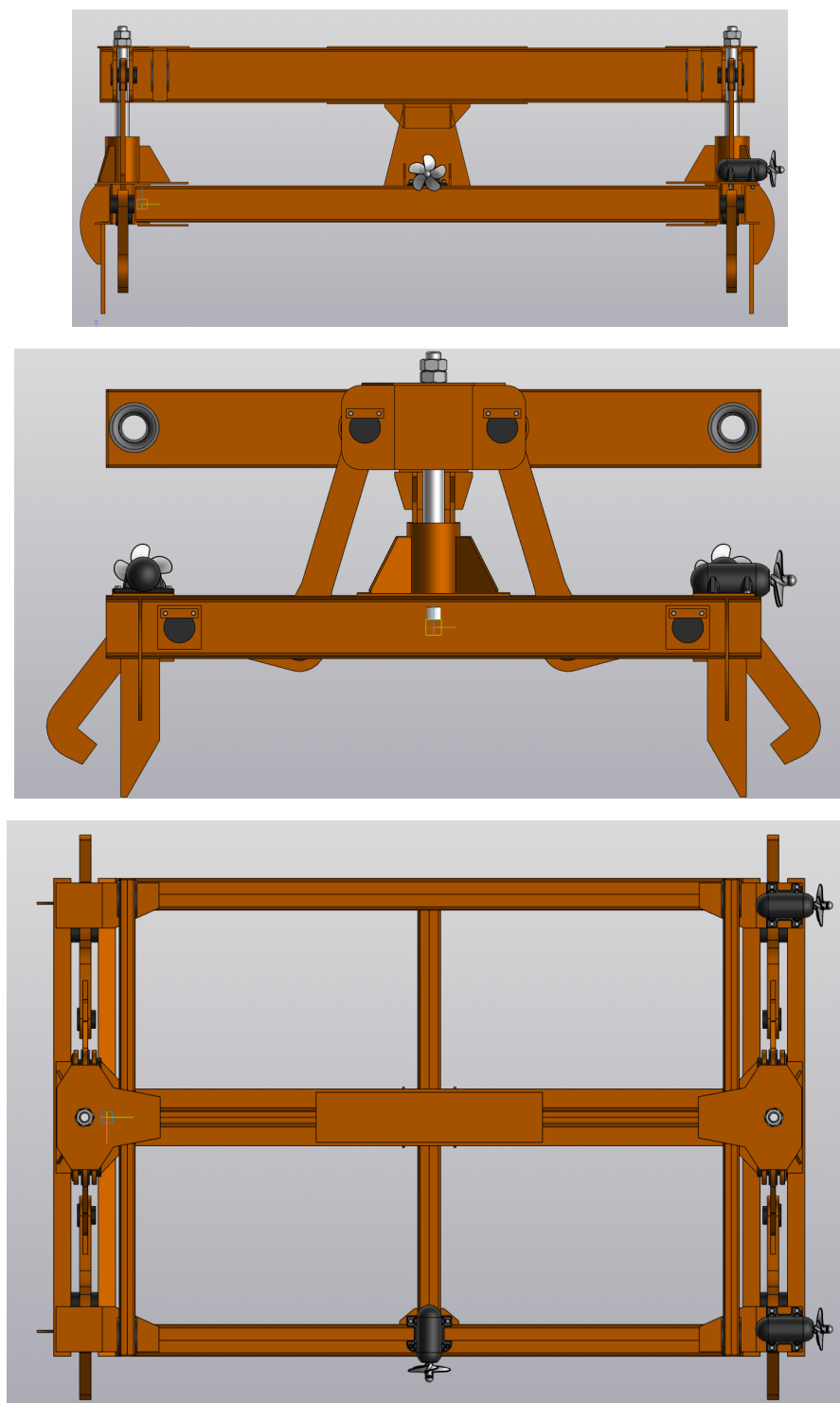


Рис. 7 – Общий вид самонаводящейся крышки

Для выхода на промышленную производительность на выбор предоставляется два варианта исполнения конструкции рамы, представленные на рисунках 8 и 9. Основными критериями выбора наилучшего исполнения являются: наименее возможный вес конструкции, а также наименьшее сопротивление толщ воды при опускании конструкции.

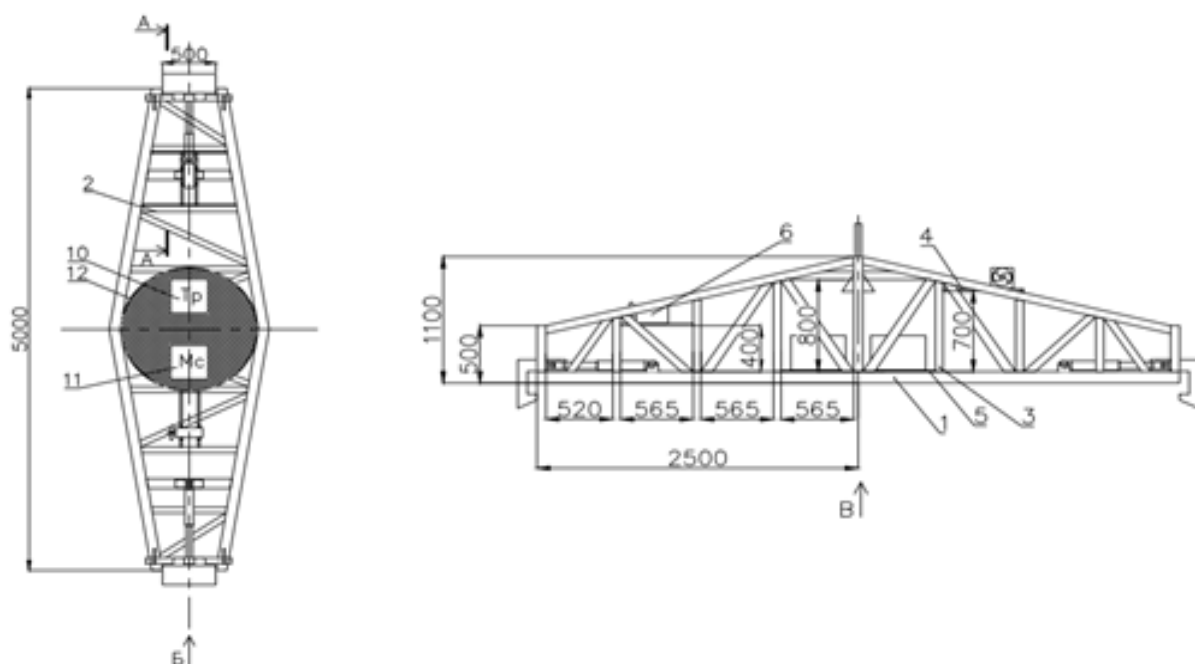


Рис. 8. Первый вариант исполнения рамы

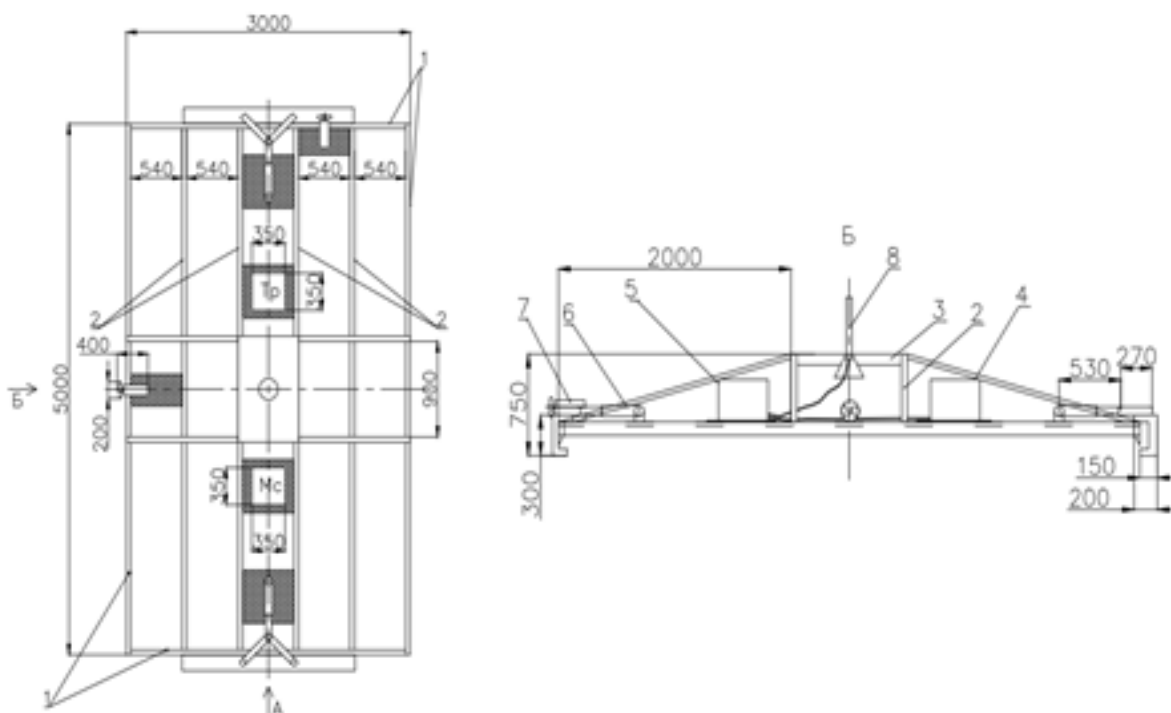


Рис. 9. Второй вариант исполнения рамы

Эти варианты рассматриваются для тяжеловесных лебедок и высокой производительности.

Расчет допускаемых напряжений

Нормативный метод оценки статической прочности сварной конструкции в соответствии с [1] основан на результатах расчетов напряжений, вызванных действием простых видов нагружения: растяжение, сжатие, изгиб.

Оценка статической прочности проведена на основании сравнения расчетных допускаемых значений напряжений для каждого рассматриваемого вида нагружения. Учет

неточности используемой, упрощенной расчетной схемы, наличие различных видов концентрации напряжений учитывается введением в расчетные формулы дополнительных коэффициентов запаса прочности.

Значение номинально допускаемого напряжения для металлоконструкций при действии статических нагрузок при расчетной температуре (20°C) выбирают минимальным из двух значений

$$[\sigma] = \eta \varphi \min \left[\frac{\sigma_T}{n_T}; \frac{\sigma_B}{n_B} \right], \quad (1)$$

где: $[\sigma]$ – допускаемое напряжение, МПа, η – коэффициент, учитывающий вид заготовки; для проката из стали 09Г2С $\eta = 1,0$, φ – коэффициент прочности сварных швов; при 100% УЗИ-контроле качества сварных швов $\varphi = 1,0$, σ_T – предел текучести материала, МПа, σ_B – предел прочности при растяжении, МПа, n_T – коэффициент запаса прочности по пределу текучести; $n_T = 1,5$, n_B – коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению; $n_B = 2,4$.

$$[\sigma] = \min \left[\frac{345}{1,5}; \frac{490}{2,4} \right] \quad (2)$$

$$[\sigma] = \min[230; 204] \quad (3)$$

Окончательно принимаем $[\sigma] = 230$ МПа.

Расчётные нагрузки

В качестве расчетных сил, действующих на элементы конструкции принято:

P – сила тяжести контейнера с грузом;

P_0 – сила тяжести конструкции.

$$P_1 = m_1 g, \quad (4)$$

где: m_1 – масса контейнера с грузом; $m = 10^4$ кг, g – ускорение свободного падения.

$$P_1 = 10^4 \cdot 9,81 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

$$P_0 = m_0 g \quad (5)$$

где: m_0 – масса конструкции; принята равной $m_0 = 0,2m_1$.

$$P_0 = 0,2 \cdot 10^4 \cdot 9,81 = 19,62 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

$$P = P_0 + P_1 \quad (6)$$

$$P = 9,81 \cdot 10^4 + 19,62 \cdot 10^3 = 11,8 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Момент сопротивления опасного сечения изгибу

$$W \geq \frac{M_{из}}{[\sigma]} \quad (7)$$

где: $M_{из}$ – изгибающий момент в опасном сечении.

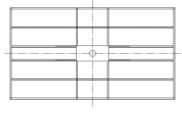
$$M_{из} \geq \frac{P}{2} \cdot a \quad (8)$$

где: a – плечо силы, равное 0,5 длины конструкции.

$$M_{из} \geq \frac{11,8 \cdot 10^4}{2} \cdot 2,5 = 14,8 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$W \geq \frac{14,8 \cdot 10^4}{230} = 641 \text{ м}^3$$

Таблица 1

Тип конструкции	Материал	$[\sigma]$, МПа	P, кН	W, м ³
	Сталь 09Г2С	230	108	586
	Нержавеющая сталь	165		818
	Титан	144		937
	Сталь 09Г2С	230	118	641
	Нержавеющая сталь	165		890
	Титан	144		1022

Первый вариант более предпочтителен из-за меньшей площади, на которую будет оказываться сопротивление толщ воды, а также из-за более высокой прочности конструкции, в которой использован тип конструкции ферма.

Экспериментальные исследования

Для проверки влияния конструкции на сопротивление от толщ воды был проведен эксперимент, в ходе которого были использованы упрощенные модели конструкции с различным целостностью плоскости сопротивления движению. Представлены модели со сплошным дном, с отверстиями малого диаметра и с крупными отверстиями (рисунок 10б).

Испытуемые объекты вертикально поднимались из стендового аквариума, высотой 0,5 метров, заполненного водой, с разной скоростью (рисунок 10а.). С помощью датчика (безмен) определялась разница в силе тяги объектов, а соответственно и сопротивлении движению в жидкости.

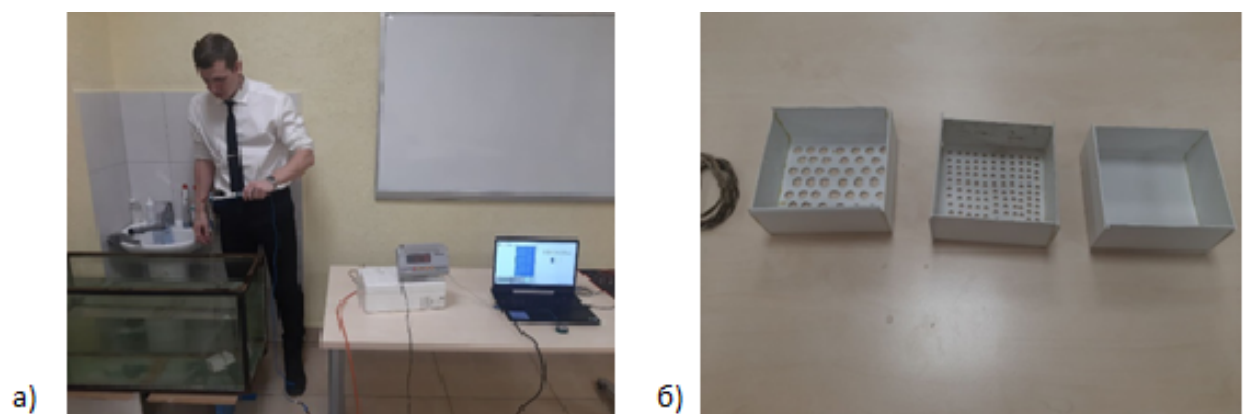


Рис. 10. Экспериментальные исследования объектов разной формы на предмет сопротивления движению в жидкости при подъеме: а) проведение эксперимента, б) упрощенный вид моделей

По результатам экспериментального исследования были получены следующие данные (рисунок 11):

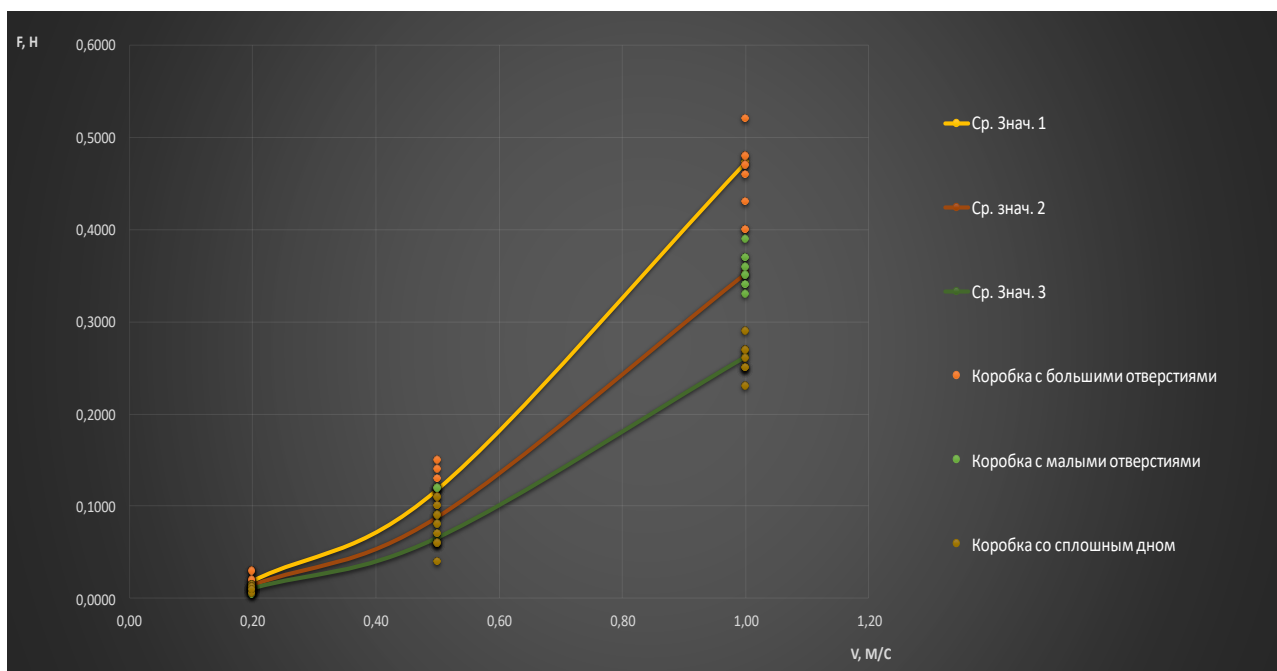


Рис. 11. Сила сопротивления модели от скорости перемещения

На основании полученных данных были произведены следующие вычисления.

Для примера расчётов был взят массив данных из 10 измерений сил сопротивления для модели со сплошным дном и скорости вытягивания 1 м/с.

Дисперсия

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}; \quad (9)$$

где: x_i — значение случайной величины, $\bar{x}$ — среднее значение, n — количество значений, которые принимает случайная величина.

$$\sigma^2 = \frac{0,0029}{10} = 0,29 \cdot 10^{-3}$$

Стандартное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}; \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{0,00029} = 0,0162$$

После анализа полученных данных были рассчитаны следующие значения дисперсии и стандартного отклонения, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2

	Тип конструкции	При 1 м/с	При 0,5 м/с	При 0,2 м/с
Дисперсия	Со сплошным дном	0,000268	0,000543	0,00000867
	С малыми отверстиями	0,001575	0,000225	0,0000611
	С крупными отверстиями	0,000287	0,000647	0,0000114
Стандартное отклонение	Со сплошным дном	0,016364	0,02331	0,002945807
	С малыми отверстиями	0,016949	0,025442	0,003384456
	С крупными отверстиями	0,039686	0,015	0,00781736

По данным в выше представленных графике и таблице можем сделать вывод, что модели со сплошным дном и отверстиями малого диаметра имеют схожие значения сопротивления, в среднем 1 Н. В то же время эксперимент с применением модели с крупными отверстиями показал увеличение силы сопротивления до средних значений в 1,25Н

Исходя из этого можем представить, что опытная модель будет выглядеть следующим образом (рис. 12).

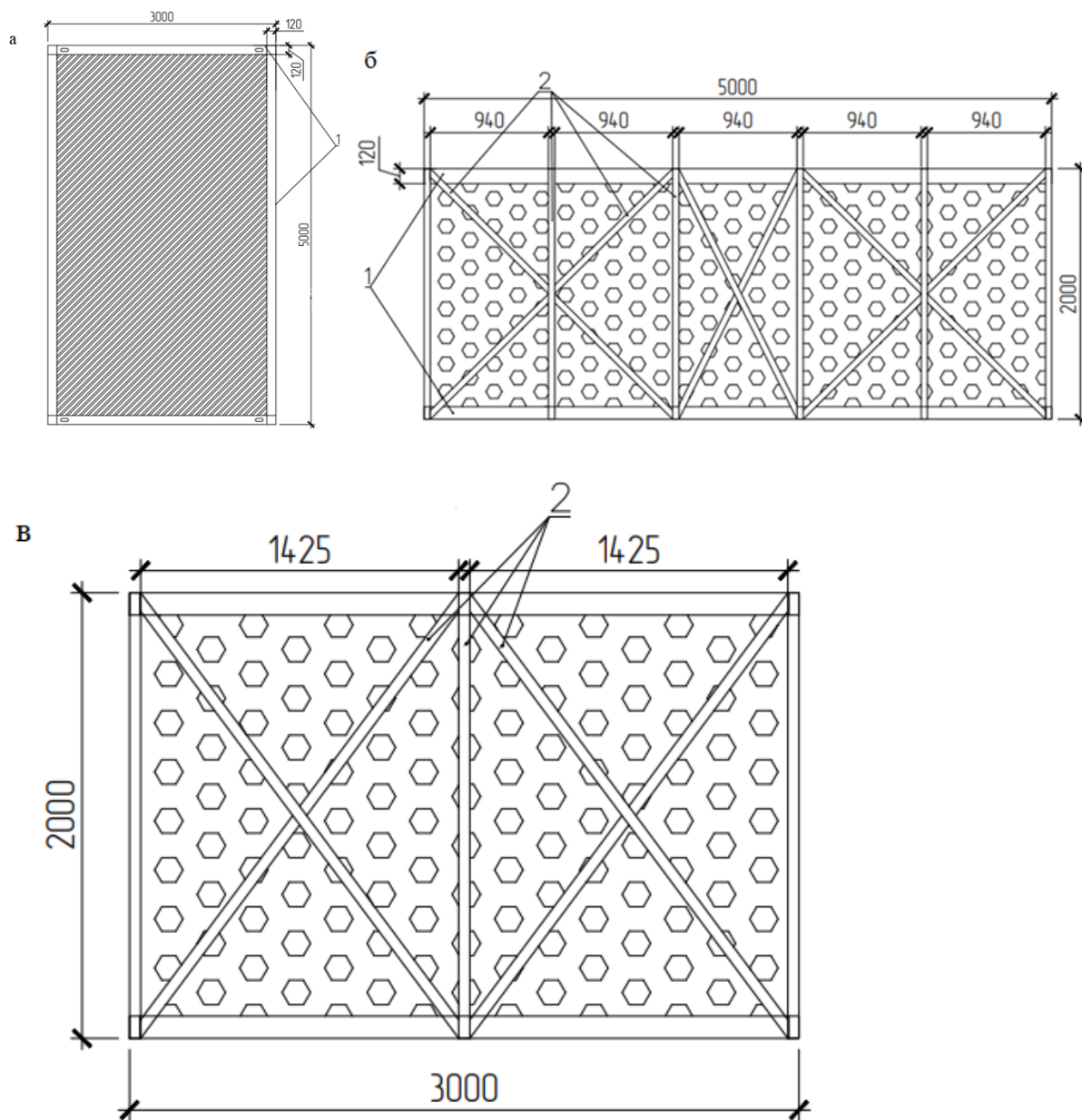


Рис. 12. Предполагаемая конструкция бункера: а - вид сверху, б – вид спереди, в – вид сбоку.

Расчет кабельтроса

Далее нужно подобрать канат, в нашем случае это должен быть кабель-трос.

Подъемные канаты рассчитываются по статическому напряжению, действие остальных нагрузок учитывается принимаемым по правилам безопасности (ПБ) запасом прочности.

Сначала подбирают подъемный сосуд, в данном случае сосуд уже подобран.

Для испытаний опытного образца используется лебедка с тяговым усилием 160 кН, для данного оборудования требуется меньший объем сосуда. Так же испытания будут производиться на меньшей глубине, всего 500 м. Морские условия и значительная глубина подъема вносят свои коррективы в стандартные методы расчета, используемые схемы и материалы. Не получится использовать стальные канаты, а значит нужно искать альтернативу. Такой альтернативой стали канаты и тросы из различных синтетических волокон, которые обладают той же прочностью, что и сталь, но их удельный вес в разы меньше.

Для расчета параметров технологического оборудования для подъема применим трос диаметром 20 миллиметров, разработанный специалистами ООО «Псковкабель».

Для расчета параметров технологического оборудования для подъема применим трос диаметром 20 миллиметров.

Масса кабель-троса для глубины 500 м будет равна 750 кг

Габаритные размеры бункера 3х2х2 м, объемом 12 м³

$m_b = 3000$ кг – масса бункера

$m_n = 16200$ кг – масса полезного ископаемого

$m_k = 2500$ кг – масса спуско-подъемного устройства

Нужно рассчитать каким разрывным усилием должен обладать наш кабель-трос. Для этого рассмотрим какие силы действуют на него.

Суммарное действие сил можно найти:

$$R > F_T + F_L - F_A$$

R – разрывное усилие кабель-троса

Рассчитаем силу тяжести:

$$F_T = (m_k + m_b + m_n + \rho H)g$$

ρ – масса одного метра кабель-троса

Предположительная масса 1 м такого кабель-троса 1,5 кг, за счет синтетических материалов получается такая незначительная масса.

$$F_T = (2500 + 3000 + 16200 + 750)9,8 = 220000 \text{ Н} = 220 \text{ кН}$$

Формула для лобовых сопротивлений при подъеме, в воде:

$$F_L = C_x \frac{\rho V^2}{2} S$$

ρ – плотности жидкости

V – скорость движения

S – площадь Миделевого сечения

C_x – коэффициент сопротивления, зависит от формы обтекаемой поверхности

$V = 1$ м/с – скорость подъема, обусловлена движением груза через толщу воды

Поднимать с большей скоростью опасно, так как нагрузка на канаты увеличивается в квадратичной зависимости

$$F_L = 1,05 \frac{1000 * 1^2}{2} 16 = 3150 \text{ Н} = 3,15 \text{ кН}$$

Рассчитаем силу Архимеда:

$$F_A = \rho g V_c$$

$$F_A = 1000 * 9,8 * 15 = 147000 \text{ Н} = 147 \text{ кН}$$

Рассмотрим суммарное действие сил:

$$R > 220 \text{ кН} + 3,15 \text{ кН} - 147 \text{ кН}$$

$$R > 76 \text{ кН}$$

Также можно представить это в тоннах, чтобы можно наглядно представить сколько, мы сможем поднимать:

$$R > 7,6 \text{ т}$$

Соответственно при коэффициенте запаса прочности 2,2, нужен кабель-трос с разрывным усилием 15,2 т.

Для выхода на производственную мощность требуется увеличить объем бункера и произвести аналогичные вычисления.

Габаритные размеры 3х5х2 м, объемом 30 м³

$m_b = 23500 \text{ кг}$ – масса бункера

$m_n = 81000 \text{ кг}$ – масса полезного ископаемого

$m_k = 1000 \text{ кг}$ – масса спуско-подъемного устройства

Также стоит сказать, что расчет будем производить для глубины 5000м

$H = 5000 \text{ м}$ – высота подъема (взята условно, можно произвести расчет и для других глубин).

Для глубоководного применения примем длину троса равную пяти километром.

Масса такого троса 1500 кг/км.

$$l = 5000 \text{ м}, m_T = 7500 \text{ кг}, d = 0.020 \text{ м}$$

$$F_T = (1000 + 23500 + 81000 + 7500)9,8 = 1106800 \text{ Н} = 1106 \text{ кН}$$

$$F_L = 1,05 \frac{1000 * 1^2}{2} 16 = 7900 \text{ Н} = 7,9 \text{ кН}$$

$$F_A = 1000 * 9,8 * 30 = 294000 \text{ Н} = 294 \text{ кН}$$

$$R > 1106 \text{ кН} + 7,9 \text{ кН} - 294 \text{ кН}$$

$$R > 821 \text{ кН}$$

Также можно представить это в тоннах, чтобы можно наглядно представить сколько, мы сможем поднимать:

$$R > 83 \text{ т}$$

Соответственно при коэффициенте запаса прочности 2,2, нужен кабель-трос с разрывным усилием 166 т.

Максимальное значение динамической составляющей растягивающего усилия при начальной скорости рывка определено в соответствии с методикой, изложенной в справочнике Александра М.Н. «Судовые устройства».

На рисунке 13 приведены графики зависимости диаметра кевларового троса с коэффициентом запаса прочности 2.2 от полезной массы поднимаемой руды с пятикилометрового дна.

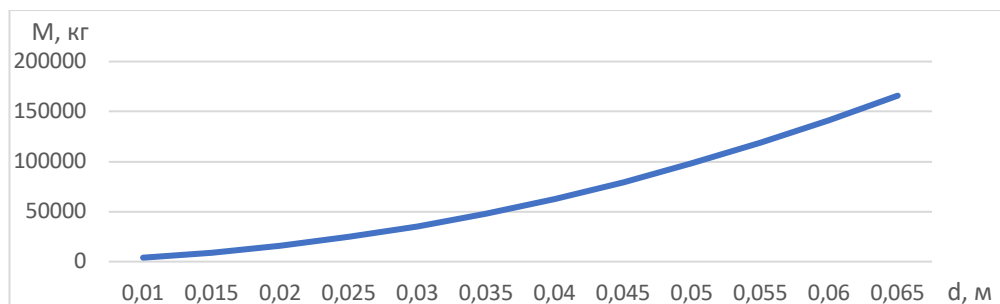


Рис. 13. Зависимость полезной массы поднимаемой руды от диаметра троса

Время сбора 30 тон руды специализированными глубоководными машинами составляет 20 минут

Время цикла составляет 1,3 часа.

Теоретическая производительность составляет 39 тонн в час.

При полной автоматизации работ (365x24) годовой оборот составляет 342 тысяч тонн.

При ручных работах (260x8) годовой оборот составляет 82 тысячи тонн.

Список литературы

1. Бреслав, Л. Б. Технико-экономические обоснования средств освоения Мирового океана. – Л.: Судостроение, 1982. – 240 с.
2. Добрецов, В. Б. Мировой океан и континентальные водоемы: минеральные ресурсы, освоение, экология / В. Б. Добрецов, В. А. Рогалев, Д. С. Опришко. – СПб.: Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы, 2007. – 796 с.
3. Юнгмейстер Д.А. Машины и оборудование для добычи железомарганцевых конкреций / Юнгмейстер Д.А., Смирнов Д.В., Вержанский А.П., Исаев. А
4. Юнгмейстер Д.А. Обоснование типов глубоководной техники для добычи морских железомарганцевых конкреций / Д.А. Юнгмейстер, С.М. Сударииков, К.А. Киреев // Записки Горного института. — 2019. — Т. 235. — С. 88-95. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.88
5. Патент № 2788227 РФ. Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых / Д.А. Юнгмейстер, В.А. Шпенст, А.В. Григорчук, А.И. Исаев, М.П. Смоленский. – Заявка № 2022123385 от 01.09.2022; опубл. 17.01.2023. Бюл. № 2.
6. Патент № 2814109 РФ. Комплекс для спуска и подъема оборудования для добычи полезных ископаемых со дна морей / Д.А. Юнгмейстер, Ф.А. Ефимов, И.А. Жуков, А.В. Беляев. – Заявка № 2023117216 от 29.06.2023; опубл. 22.02.2024 Бюл. № 6.
7. Коваль П.В. Гидравлика и гидропривод горных машин: Учебник для вузов по специальности «Горные машины и комплексы». – М.: Машиностроение, 1979 – 319 с.
8. Путилов К.А. Курс физики. Том I. Механика, акустика, молекулярная физика, термодинамика. Москва. Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. - 560 с.
9. Сударииков С.М., Юнгмейстер Д.А., Королев Р.И., Петров В.А. О возможности уменьшения техногенной нагрузки на придонные биоценозы при добыче твердых полезных ископаемых с использованием технических средств различной модификации. Записки Горного института, - 2022, 253, стр. 82-96. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.14>
10. Электронный ресурс: Предварительный выбор конструктивного типа и диаметра гребного винта, ориентировочных значений мощности, частоты вращения двигателя и (или) скорости хода судна, URL: www.lektsii.org
11. Электронный ресурс: Гребные винты, URL: xn--jlabid.xn--plai)
12. Group Navigation and Control for Marine Autonomous Robotic Complex Based on Hydroacoustic Communication / Scherbatyuk A., Dubrovin F., Rodionov A., Unru P. —// Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. — № 15. — P. 1388–1393.
13. Development of a Regional Underwater Positioning and Communication System for Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles / Sasano M., Inaba S., Okamoto A. —// Proc. of the IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV). — 2016. — № 6. — P. 431–434.
14. Navigation Method for Underwater Vehicles Based on Mutual Acoustical Positioning With a Single Seafloor Station / Maki T., Matsuda T., Sakamaki T., Ura T., Kojima J. —// IEEE J. of

- Oceanic Engineering. — 2013. — Vol. 38. January. — P. 167–177.
15. Guidance and Control of an ASV in AUV Tracking Operations / Melo J., Matos A. —// Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2008. — 2008. — № 46. — P. 1–7.
 16. Clock Synchronization and Ranging Estimation for Control and Cooperation of Multiple UUVs / Cario G., Casavola A., Djapic V., Gjanci P., Lupia M., Petrioli C., Spaccini D. —// Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2016. Shanghai, China. — 2016. — № 46. — P. 1–9.
 17. Coordinated Operation of Autonomous Underwater and Surface Vehicles / Matos A., Cruz N. —// Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS — 2007. — № 46. — P. 1–6.
 18. Cooperative Positioning and Navigation for Multiple AUV Operations / Baccou P., Jouvencel B., Creuze V., Rabaud C. —// Proc. of the MTS/ IEEE Int. Conf. and Exhibition OCEANS— 2001. — № 3. —P. 1816–1821.
 19. Experimental Validation of the Moving Long Base Line Navigation Concept / Vaganay J., Leonard J., Curcio J., Willcox S. —// Proc. of the Int. Conf. AUV. — 2004. — № 4. — P. 1–7.
 20. An Algorithm for Cooperative Navigation of Multiple UUVs / Zhang L., Xu D., Liu M., Yan W., Gao J. —// Proc. of the sixth Int. Symposium on Underwater Technology, UT2009, — 2009. — № 78. — P. 1–6.
 21. Comparing Kalman and particle filter approaches to coordinated multi-vehicle navigation / Mirabellot D., Sandersont A., Blidberg D. —// Proc. of the Int. Conf. UUST 2007. — 2007. — № 78. — P. 1–6.
- (Далее в основном тексте отчета на этот список ссылок нет)
22. Conte G., SerraniA. Robust control of a remotely operated underwater vehicle. Automatica. 1998. Vol. 34. No. 2. P. 193–198.
 23. Елкин А.В., Комаров В.С., Розман Б.Я. Телеуправляемые подводные аппараты-роботы «ГНОМ» // Освоение морских глубин: сборник статей. М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2018. С. 332–336.
 24. Константян В.Н., Нахушев Р.С., Яхутлов У.М. Система инерциальной навигации комплекса симуляции полета // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2018. Т. 14. № 4. С. 97–103.
 25. Козинов А.В., Северов С.П. Визуализация управляемого движения подводного робота // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ 2013): материалы XIII Международной научно-технической конференции. М.: АПР, 2013. Т. 1. С. 338–343.
 26. Розман Б.Я., Елкин А.В. Конструкция подводного аппарата «СУПЕРГНОМ». М.: ООО «Издательство “Маджента”», 2018. С. 27–29.
 27. Мокиевский В.О., Спиридонов В.А., Цетлин А.Б., Краснова Е.Д. Современные дистанционные методы в изучении морских донных сообществ и ландшафтов прибрежной зоны // Труды Беломорской биостанции МГУ. 2012. Т. 11. С. 3–6.