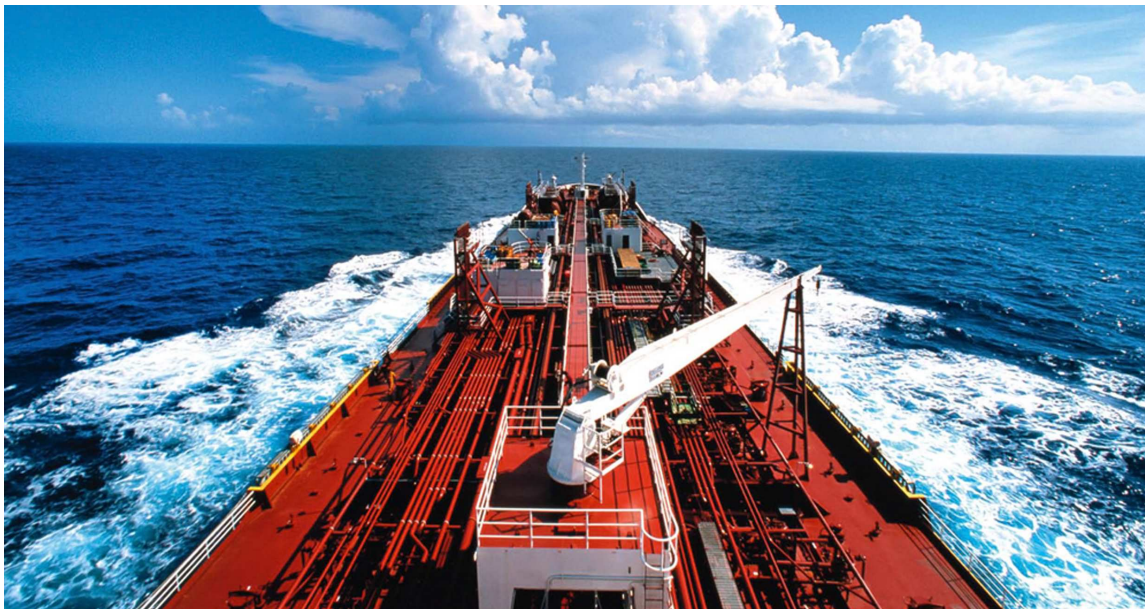




## ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 623.8/9(075.8)

### НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЛУБОКОВОДНОГО АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО НЕОБИТАЕМОГО АППАРАТА С МАНИПУЛЯТОРОМ

**С.В. Медовник**, магистр, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Приморский край, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: corwin.36.me@gmail.com

**А.П. Аносов**, д-р техн. наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Приморский край, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: anosov49@mail.ru

Активное освоение океана развитыми странами диктует необходимость интенсивного проведения глубоководных работ средствами без прямого управления человеком, то есть при помощи автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). В последнее время особенную актуальность приобретает установка на АНПА манипуляторов. Представлен вариант классификации гибридных аппаратов (ГНПА). Рассмотрены основные этапы проектирования аппарата: расчет прочных корпусов с применением систем автоматизированного проектирования, определение основных характеристик и размеров. Представлен вариант компоновки самоуравновешенного манипуляционного комплекса.

**Ключевые слова:** автономный необитаемый подводный аппарат, манипулятор, резидентная робототехника, расчет прочности корпуса подводного аппарата.

### ASPECTS OF THE DESIGN OF A DEEP-SEA AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE WITH A MANIPULATOR FOR DEPTHS UP TO 3000 METERS

**S.V. Medovnik**, MSc, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russkii Island, Ajax Bay, 10, e-mail: corwin.36.me@gmail.com

**A.P. Anosov**, DSc, Professor, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russkii Island, Ajax Bay, 10, e-mail: anosov49@mail.ru

Active development of the ocean by developed countries dictates the need for intensive deep-sea operations without direct human control by means of autonomous underwater vehicles (AUVs). Recently, the installation of manipulators on AUVs has become of particular relevance. A variant of hybrid submersibles classification is presented. The basic stages of vehicle design are considered: calculation of strong hulls using computer-aided design systems, determination of main characteristics and dimensions. A variant of the self-equilibrated manipulator complex layout is presented.

**Keywords:** autonomous unmanned underwater vehicle, manipulator, resident robotics, calculation of underwater vehicle hull strength.

## ВВЕДЕНИЕ

Активное освоение океана развитыми странами диктует необходимость интенсивного проведения как подводных работ на малых и средних глубинах, так и глубоководных, на различных объектах и в различных условиях. Это всегда было сложным процессом, требующим трудоемкого и технически сложного подхода. В этой связи особую важность приобретает специальное судостроение, в частности разработка и постройка подводных аппаратов. Использование ГНПА (гибридные необитаемые подводные аппараты) значительно расширяет функциональность этого объекта морской техники, однако такая связка добавляет ряд сложностей в процесс проектирования. Актуальность обусловлена необходимостью наращивать объемы проектирования и производства гибридных роботов вследствие удобства их использования в областях добычи различных ресурсов со дна моря и исследования Мирового океана на больших глубинах. Необходимо отметить, что резидентские аппараты, действующие автономно с применением манипуляционного комплекса, могут быть незаменимы при работе в следующих областях: исследование месторождений углеводородов и полезных ископаемых, проведение геологоразведки, проведение исследований в области морской биологии, при анализе биоразнообразия, проведение поисково-спасательных работ, установка и обслуживание различного оборудования, в том числе подводных коммуникационных кабелей, трубопроводов и других систем. Для рассмотрения некоторых аспектов методики проектирования АНПА с манипуляторами для больших глубин (3000 м) необходимо решить следующие задачи.

1. Выполнить обзор и анализ проектных характеристик существующих ГНПА. Разработать классификацию ГНПА.

2. Разработать конструкцию прочного корпуса, отвечающего условиям прочности и устойчивости.

3. Определить массогабаритные характеристики при помощи систем автоматизированного проектирования (САПР).

4. Определить основные характеристики аппарата и его размерения.

5. Выбрать вариант компоновки манипуляционного комплекса на основе эксплуатационных характеристик.

Статья посвящена исследованию в рамках задач, оговоренных в пунктах 1 — 3 и 5, а именно формированию классификации ГНПА, разработке конструкции прочного корпуса (в том числе при помощи САПР) и выбору манипуляционного комплекса аппарата.

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ АНПА С МАНИПУЛЯТОРОМ

Актуальность изучения АНПА с манипулятором заключается, в частности, в росте спроса на них в исследованиях месторождений углеводородов и полезных ископаемых, при проведении геологоразведки, исследований в области морской биологии, поисково-спасательных работ и др. Существенный вклад в изучение методов разработки ГНПА внесли Ю.В. Матвиенко, В.В. Костенко, А.Ф. Щербатюк, А.В. Ремезков, В.А. Бобков, М.А. Морозов, А.А. Шупикова и А.В. Инзарцев [1, 2] (вопросы определения гибридных аппаратов, вопросы использования резидентной схемы); А.Ю. Коноплин и П.А. Пятавин [3] (вопросы применения манипуляторов, вопросы стыковки), Л.В. Киселев, В.В. Костенко, А.В. Медведев, А.Ю. Быканова, А. Ю. Толстоногов [4, 5] (вопросы установки манипулятора на АНПА и его позиционирования).

На базе изученных источников, а также существующих подводных роботов подобного типа [6] предлагается вариант классификации ГНПА. Подробное описание объектов и расшифровка классификации представлены в статье [7]. В табл. 1 приведена классификация аппаратов в соответствии с предложенными классификационными признаками.

Были рассмотрены три наиболее характерных представителя АНПА с манипуляторами. С опорой на существующие классификации манипуляторов были выбраны основные классификационные признаки для выбранного класса объектов морской техники. Дальнейшее расширение фронта подводных работ будет определять новые классификационные признаки в дополнение к названным в предложенной классификации.

Таблица 1

Характеристики АНПА с манипуляторами

| Классификационный признак       | АНПА                                           |                       |                                                 |
|---------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|
|                                 | Freedom                                        | Океанос               | ММТ-3500                                        |
| Максимальный вылет манипулятора | Малый (менее 1 м)                              | Большой вылет (1,2 м) | Большой вылет (1 м)                             |
| Количество степеней свободы     | 1                                              | 3                     | 3 (в разработке дополнительная степень свободы) |
| Вид рабочего органа             | Сменные (схват, щетка, распылитель, мультитул) | Схват                 | Схват                                           |
| Расположение манипулятора       | В оконечностях (нос и корма)                   | В носу                | В центре тяжести аппарата                       |
| Тип исполнения                  | Внешний                                        | Внутренний            | Внешний                                         |
| Количество манипуляторов        | 2                                              | 1                     | 1                                               |

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И РАСЧЕТ ПРОЧНОГО КОРПУСА АНПА

Прочный корпус служит для размещения оборудования, которое должно быть изолировано от воздействия окружающей среды. В нем размещаются приборы управления, навигации, вычислительная техника вместе с накопителями информации, а также аккумуляторная батарея. Существенное значение имеет вопрос обеспечения прочности непроницаемого корпуса при заданной глубине погружения. Прочный корпус представляет собой оболочку в виде тела вращения, воспринимающую наружное давление. Расчет такой оболочки должен выполняться согласно ГОСТ [8]. Ниже в качестве иллюстрации представлены результаты расчета прочного корпуса диаметром более 200 мм без набора и с набором, однако, как показал анализ, целесообразным для данного диаметра является первый вариант. В качестве материала использован сплав В95 на основе алюминия [9].

Определение размеров элементов прочного корпуса выполнено для расчетной нагрузки, которая определяется в зависимости от расчетной глубины погружения по формуле:  $p = \rho_0 g h_p / 1000$ , где  $\rho_0$  — плотность морской воды,  $g$  — ускорение свободного падения,  $h_p = 1,2 h_{\text{раб}}$  — расчетная глубина погружения. На рис. 1 представлена схема фрагмента прочного корпуса с подкреплениями (кольцевыми шпангоутами) и без подкреплений.

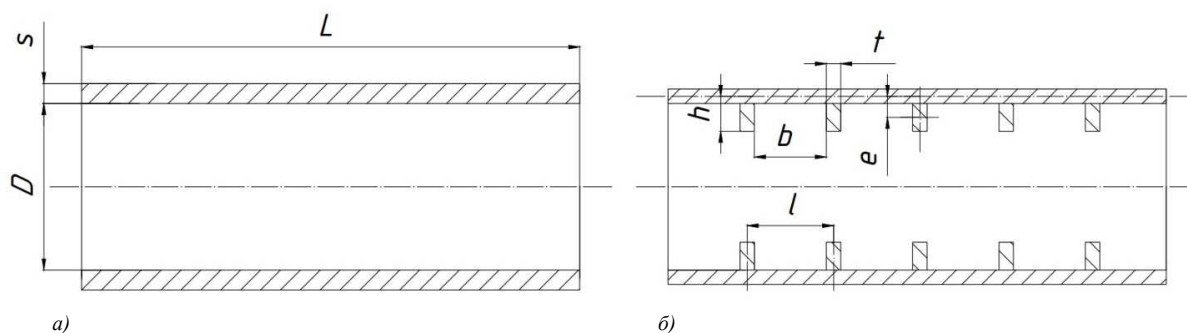


Рис. 1. Прочный корпус АНПА: а — не подкрепленный шпангоутами; б — подкрепленный шпангоутами.

$D$  — внутренний диаметр прочного корпуса;  $L$  — длина;  $s$  — толщина стенки;

$l$  — шпация;  $t$  — толщина кольцевого шпангоута;  $h$  — высота кольцевого шпангоута;

$e$  — расстояние между центрами тяжести сечения обечайки и кольцевого шпангоута

Условия применения расчетных формул:

$$s/D < 0,1 \text{ при } D \geq 200 \text{ мм;} \quad (1)$$

$$s/D < 0,3 \text{ при } D < 200 \text{ мм,} \quad (2)$$

где  $s$  — толщина стенки корпуса;  
 $D$  — внутренний диаметр корпуса.

Толщина цилиндрической оболочки прочного корпуса АНПА, не подкрепленной шпангоутами и находящейся под воздействием внешнего гидростатического давления, в первом приближении может быть определена по формуле:

$$s = \frac{1,2pD}{2\sigma_T - p}, \quad (3)$$

где  $p$  — гидростатическое внешнее давление при принятой глубине погружения АНПА;  
 $\sigma_T$  — допускаемое напряжение для материала прочного корпуса.

Для того чтобы определить расчетное допускаемое наружное давление, следует использовать формулу, которая выражает зависимость между искомым давлением и допускаемыми давлениями отдельно из условий прочности и устойчивости:

$$P = P_n / \sqrt{1 - (P_n/P_E)^2}, \quad (4)$$

где  $P_n$  — допускаемое давление из условий прочности вычисляют по формуле:

$$P_n = \frac{2\sigma_T s}{D + s}, \quad (5)$$

$P_E$  — допускаемое давление из условий устойчивости в пределах упругости вычисляют по формуле:

$$P_E = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E D}{n_0 B l} (100s/D)^{2,5}, \quad (6)$$

где  $B$  — безразмерный коэффициент, который вычисляется по формуле:

$$B = \min(1; 9,45 \cdot D/l \sqrt{D/100s}). \quad (7)$$

В табл. 2 приведены результаты расчета максимальной глубины погружения.

Таблица 2

Расчет максимальной глубины погружения для цилиндрических корпусов без подкреплений

| Наименование                                          | Обозначение             | В95    |
|-------------------------------------------------------|-------------------------|--------|
| Глубина погружения                                    | $h$ , м                 | 3600   |
| Предел текучести                                      | $\sigma_T$ , МПа        | 410    |
| Модуль продольной упругости                           | $E$ , Н/мм <sup>2</sup> | 0,074  |
| Длина аппарата                                        | $L$ , мм                | 450    |
| Внутренний диаметр                                    | $D$ , мм                | 150    |
| Толщина стенки                                        | $s$ , мм                | 7,5    |
| Давление на глубине                                   | $p = pgh$ , МПа         | 36,20  |
| Допускаемое наружное давление из условия прочности    | $P_n$                   | 39,05  |
| Допускаемое наружное давление из условия устойчивости | $P_E$                   | 102,43 |
| Допускаемое наружное давление                         | $P$                     | 36,49  |
| Максимальная глубина погружения                       | $h$ , км                | 3,63   |
| Масса обечайки                                        | $m$ , кг                | 4,76   |

При расчете обечайки с подкреплениями (кольцевыми шпангоутами) необходимо рассчитать коэффициент  $K$  по формуле:

$$K = \frac{p(D+s)}{2\sigma_T s} - 1. \quad (8)$$

Если  $K < 0$ , то подкрепление кольцевыми шпангоутами не требуется. При этом должно выполняться условие:

$$0 < K < 1. \quad (9)$$

Расстояние между ребрами жесткости определяется как:

$$b = \sqrt{Ds(2/K - (1+1/K))}. \quad (10)$$

Площадь поперечного сечения кольцевого шпангоута вычисляют как:

$$A_k \geq \frac{ls\sigma_T}{\sigma_K K}, \quad (11)$$

где  $l$  — шпация;  
 $\sigma_K$  — предел текучести материала шпангоута.

Эффективную ширину присоединенного пояска  $l_e$  вычисляют как:

$$l_e = \min(l; t + \sqrt{Ds}), \quad (12)$$

где  $t$  — ширина кольца (шпангоута) в поперечном сечении; в первом приближении можно принять  $t = s$ .

Эффективный момент инерции расчетного поперечного кольцевого шпангоута определяется как:

$$I = th_k^3/12 + ls^3/10,9 + e^2 \frac{A_k l_e s}{A_k + l_e s}, \quad (13)$$

где  $h_k$  — расстояние от центра тяжести поперечного сечения обечайки до свободной кромки шпангоута;  
 $e$  — расстояние между центром поперечного сечения обечайки до центра тяжести сечения кольца.

Коэффициент жесткости обечайки  $k$  вычисляют по формуле:

$$k = \sqrt{(10,9I)/(s^3 th_k^3/12)}. \quad (14)$$

Допускаемое наружное давление вычисляется по формуле (1.6), однако параметры условий прочности и устойчивости определяются по формулам:

$$P'_n = \frac{2\sigma s + 2A_k \sigma / l}{D + s}, \quad (15)$$

$$P'_E = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} E}{kB'} \frac{D}{L} \left( \frac{100ks}{D} \right)^{2,5}, \quad (16)$$

где  $B'$  — безразмерный коэффициент, который вычисляется по формуле:

$$B' = \min(1; 9,45 \cdot D/l \sqrt{D/100s}). \quad (17)$$

Ниже приведена табл. 3, в которой при изменении значения  $s$ ,  $t$ ,  $h$ ,  $l$ ,  $b$  выполнен расчет максимальной глубины погружения.

Таблица 3

Расчет максимальной глубины погружения цилиндрического корпуса с подкреплениями для сплава В95

| Наименование                                          | Величина                | Значение | Округление величин |
|-------------------------------------------------------|-------------------------|----------|--------------------|
| Обоснование необходимости колец                       | $K$                     | 0,245    | —                  |
| Расстояние между двумя кольцами жесткости             | $b$ , мм                | 40,44    | 70 (4шп)           |
| Толщина стенки                                        | $s$ , мм                | 6        | —                  |
| Толщина кольца жесткости                              | $t$ , мм                | 6        | —                  |
| Центр величины кольца жесткости                       | $e$ , мм                | 13       | —                  |
| Шпация                                                | $l$ , мм                | 76       | —                  |
| Ширина присоединенного пояска                         | $l_e$ , мм              | 76       | —                  |
| Площадь поперечного сечения кольцевых шпангоутов      | $A_k$ , мм <sup>2</sup> | 111,49   | 120                |
| Высота кольца жесткости                               | $h$ , мм                | 18,58    | 20                 |
| Эффективный момент инерции                            | $I$ , мм <sup>4</sup>   | 21 561   | —                  |
| Коэффициент жесткости обечайки                        | $k$                     | 3,78     | —                  |
| Допускаемое наружное давление из условия прочности    | $P'_n$ , МПа            | 39,84    | —                  |
| Допускаемое наружное давление из условия устойчивости | $P'_E$ , МПа            | 149,24   | —                  |
| Безразмерный коэффициент                              | $B'$                    | 0,81     | —                  |
| Допускаемое наружное давление                         | $P'$ , МПа              | 38,49    | —                  |
| Проверка                                              | $h$ , м                 | 3828     | —                  |

Использование обечаек с подкреплениями позволяет снизить массу конструкции (5,08 кг против 4,33 кг). Однако снижение веса на 15 % для малогабаритного корпуса малой массы можно считать несущественным на фоне высоких технологических проблем при изготовлении обечаек с набором. Кроме того, шпангоуты отнимают часть внутреннего пространства, усложняя тем самым размещение оборудования.

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОГО КОРПУСА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РАСЧЕТНОЙ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ

Совершенствованию методики проектирования подводных аппаратов, тесно связанной с обеспечением прочности их корпусов, уделяется большое внимание. Рассмотрены вопросы анализа напряженного состояния оболочечных конструкций и их устойчивости, а также применимости и поведения различных материалов.

Выбор толщины обшивки корпуса напрямую зависит от геометрических размеров АНПА и механических свойств материала.

Получена зависимость толщины обшивки от изменения глубины погружения. Видно, что с ростом глубины погружения (внешнего давления) увеличивается относительная разница толщин, а следовательно, и веса корпуса аппарата, изготовленного из низко- и высокопрочного материала. Это означает, что для аппаратов, предназначенных для больших глубин погружения, целесообразно использовать высокопрочные материалы, в то время как при малых глубинах следует применять менее прочные материалы.

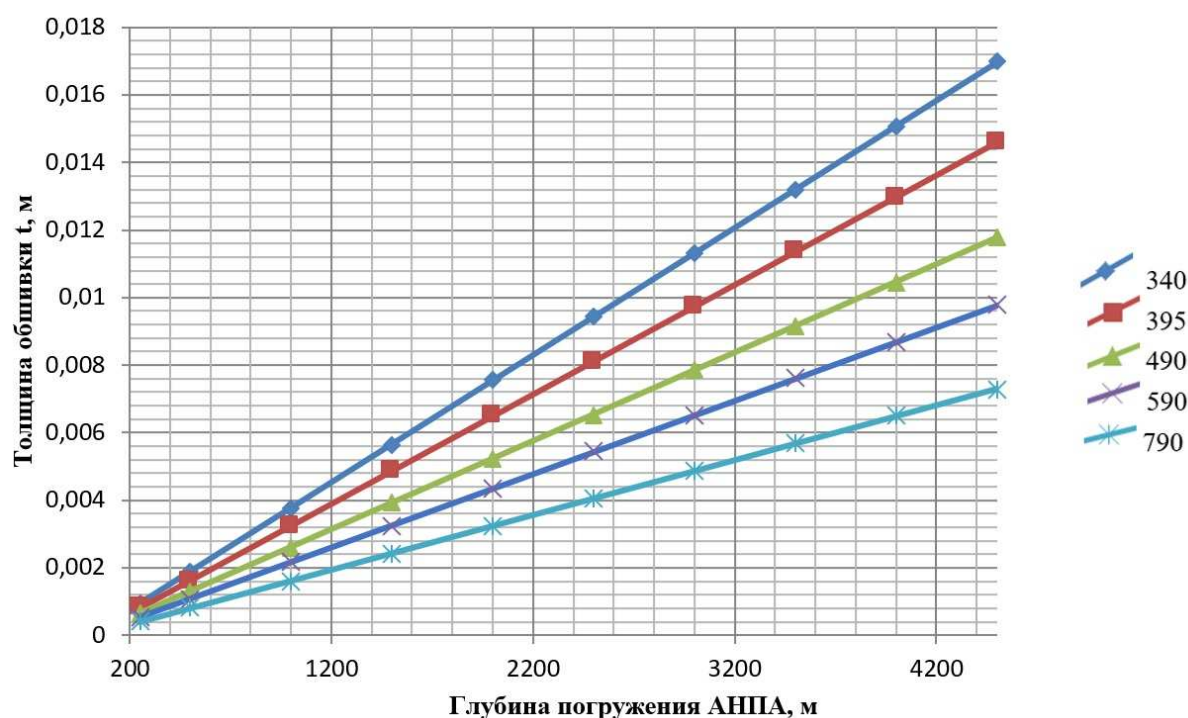


Рис. 2. Зависимость толщины обшивки от глубины погружения

Установка шпангоутов обеспечивает снижение толщины обшивки. При этом могут возникнуть технологические трудности при малых величинах расчетной шпации.

Критерием предельной величины шпации при проектировании АНПА является условие прочности корпуса на заданной глубине погружения. Расчет шпации выполнен по формуле:

$$l = R \left( \frac{100}{R} t \right)^2 \left( 0,67 \frac{100 E t / R}{\sigma 10^2} + 0,062 \right). \quad (18)$$

Из полученных графиков следует, что значение шпации очень мало. Приемлемое значение шпации, при котором технологический процесс не будет затруднителен при малых диаметрах корпуса, составляет более 0,1 м. Таким образом, даже при выигрыше при максимальном гидростатическом давлении в 1,5 раза изготовление этого прочного корпуса с применением шпангоутов нецелесообразно.

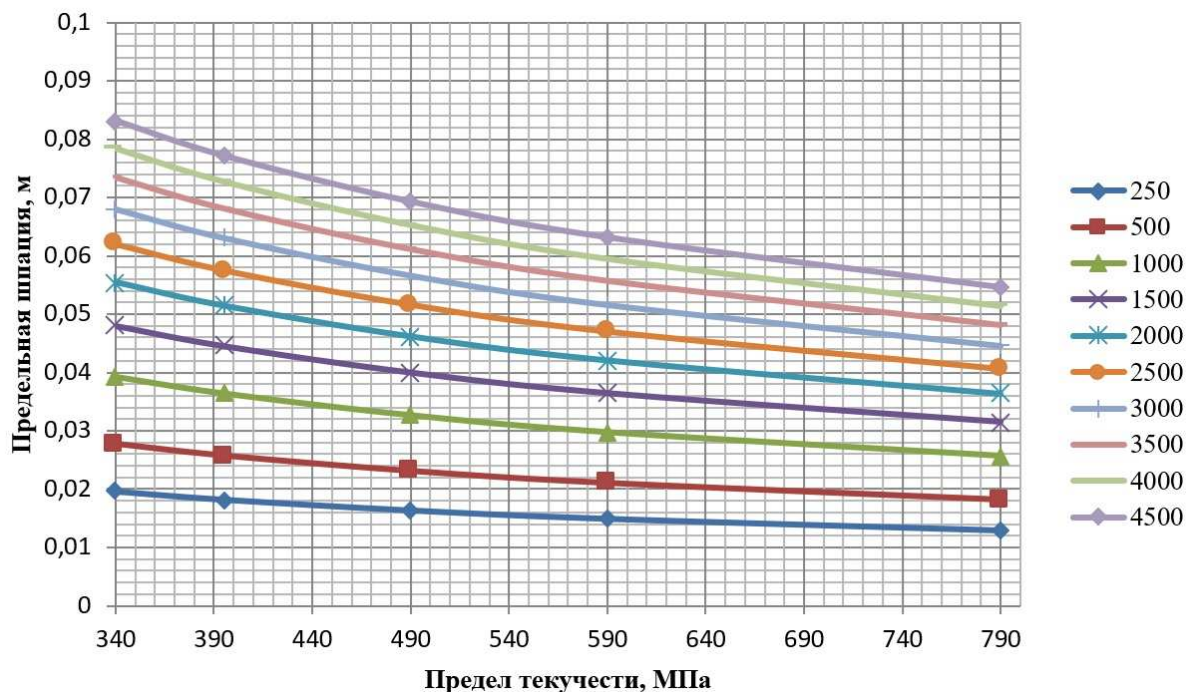


Рис. 3. Зависимость размеров предельной шпации от предела текучести для разных глубин погружения

Выполнена оценка прочности корпуса, подкрепленного кольцевыми шпангоутами, по допускаемым напряжениям, а также проверка устойчивости при действии наружного давления.

В результате оценки зависимости характеристик прочного корпуса от глубины погружения можно констатировать:

- 1) при проектировании глубоководных аппаратов необходимо стремиться к выбору материала с более высокими показателями предела текучести согласно с весовыми характеристиками;
- 2) при малой величине шпации целесообразно не подкреплять прочный корпус кольцевыми шпангоутами, соответственно увеличив толщину обшивки.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОГО КОРПУСА АНПА

При создании конструкций АНПА необходимо четко определить их массогабаритные характеристики. При это необходимо понимать, что прочный корпус — это не только прочная непроницаемая оболочка (контейнер), но и жестко сопряженные с ней элементы размещения и крепления аппаратного комплекса (рама). Для облегчения трудоемкости расчета массы, а также проверки расчетов прочности рассмотрена возможность использования системы автоматизированного проектирования (САПР). Необходимо построить модель прочного корпуса АНПА, который включает:

- контейнеры с оборудованием;
- рамы размещения оборудования.

Создание модели прочного корпуса выполнено в САПР SolidWorks.

Форма прочного контейнера АНПА представляет собой цилиндр, который оканчивается сферой в носу и уменьшается в диаметре в корме. Поверхность создана вращением образующей вокруг заданной оси. При помощи инструментов САПР были созданы детали корпуса и крышек контейнера, которые были совмещены в общей сборке. Результат показан на рис. 4.

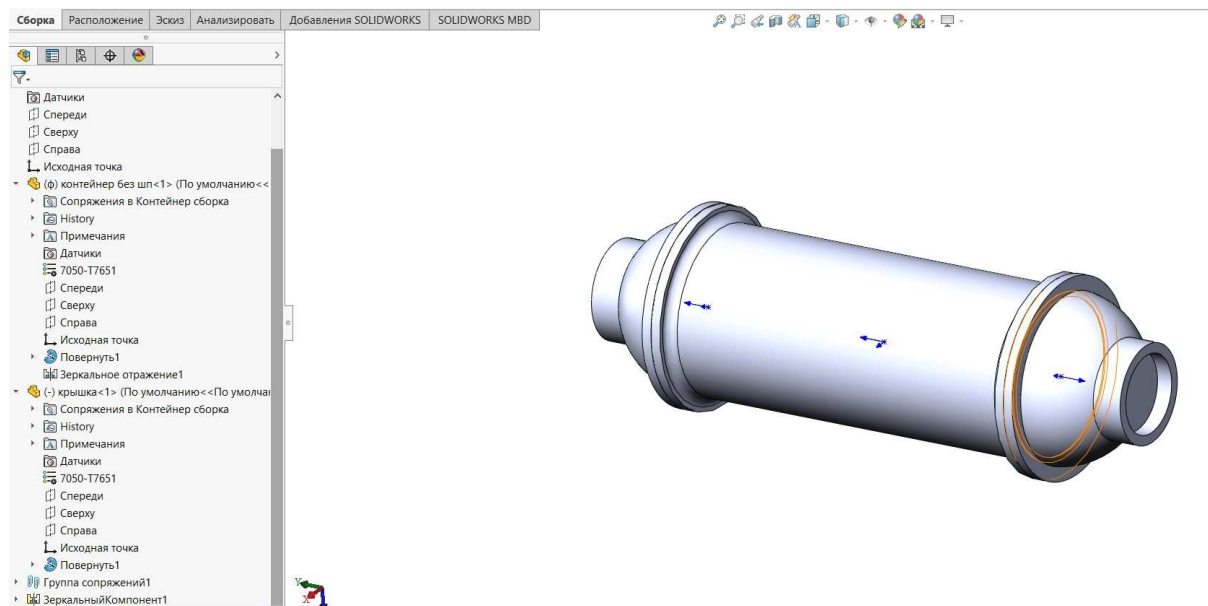


Рис. 4. Сборка контейнера с «деревом» модели

Для того чтобы рассчитать напряженно-деформированное состояние корпуса АНПА, инициируется исследование с помощью блока Simulation из дополнений Solid Works. Сборка фиксируется при помощи точек закрепления, задается сетка и давление  $P=42$  МПа. На рис. 5 показана сборка с заданными параметрами.

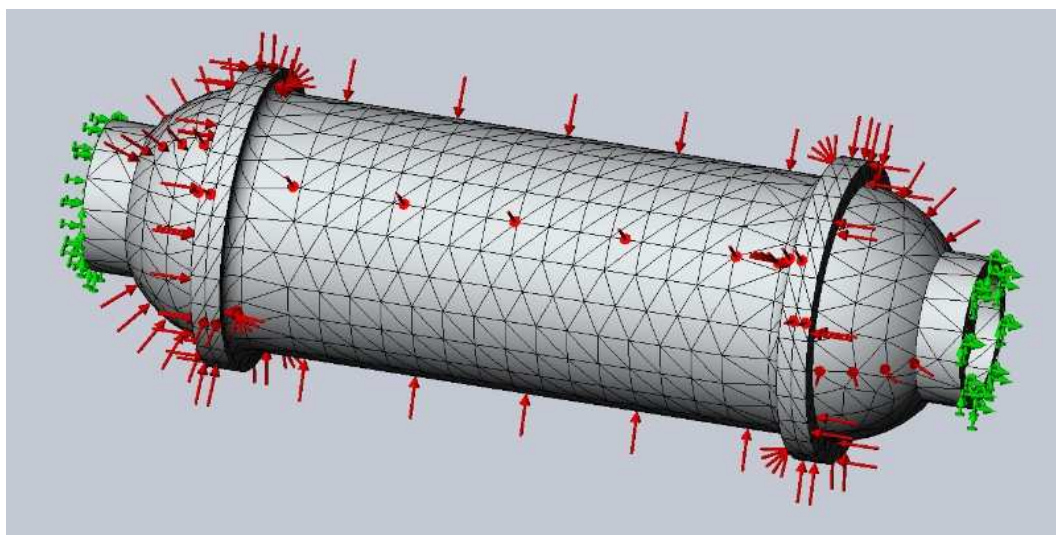


Рис. 5. Давление на корпус с созданной сеткой

Нажатием на кнопку «Запустить это исследование» выполняется счет. На модели в цветовой идеализации отображаются показатели напряжений, деформаций и перемещений. Результат исследования показан на рис. 6.

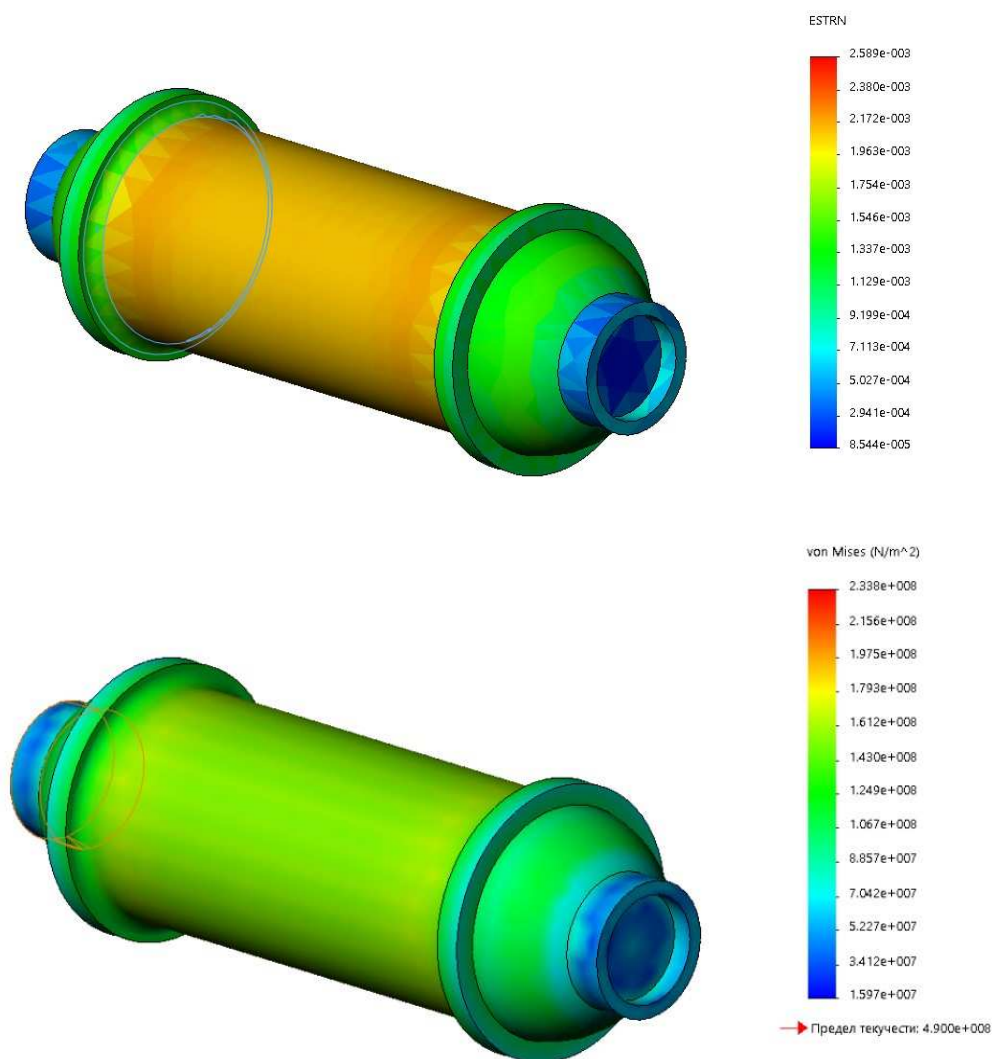


Рис. 6. Деформация и напряжения при расчетном давлении на контейнер

Далее необходимо собрать элементы оснастки прочного корпуса в виде пластин для размещения «начинки», которые, в свою очередь, собираются в блоки. На рис. 7 изображены детали оснастки.

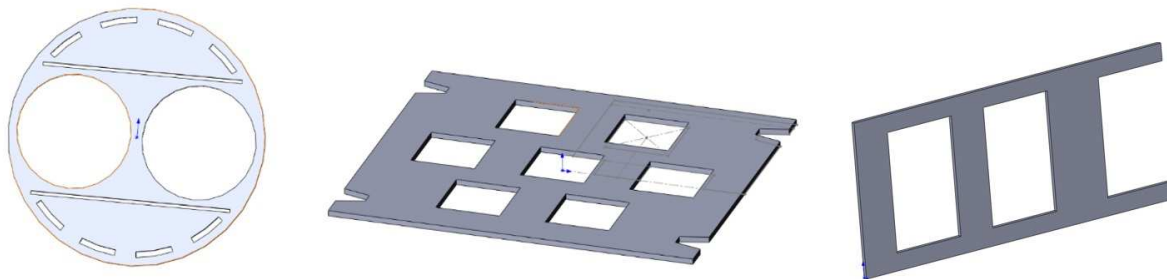


Рис. 7. Плоскостные детали каркаса

Далее формируются блоки, собранные из плоскостных деталей и контейнеров, которые, в свою очередь, собираются в общую конструкцию. Финальная сборка представлена на рис. 8.



Рис. 8. Сборка блоков

При помощи инструмента САПР была определена общая масса прочного корпуса АНПА, которая составила 71,32 кг.

## ВЫБОР МАНИПУЛЯЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ГНПА

Одним из основных преимуществ НПА и автономных роботов является их модульность. То есть при необходимости те или иные унифицированные модули могут быть заменены в зависимости от целей каждого погружения. Таким образом, манипулятор целесообразно разместить в отдельном блоке, который при необходимости можно отсоединять от АНПА. Еще одной немаловажной задачей является обеспечение нулевой плавучести и самоуравновешенности манипулятора, чтобы его перемещения не влияли на балансировку аппарата. Учитывая тенденции в развитии АНПА с манипуляторами, а также исходя из длины прототипа без блока манипулятора (3 м), рациональная длина последнего должна составлять около 1 м [10].

Части манипулятора называются в соответствии с частями тела человека (предплечье, кисть). На конце расположен хват (кисть). Основание манипулятора жестко крепится к корпусу модуля. Для дальнейшей оценки рабочего пространства манипулятора на данном этапе необходимо определить степень подвижности манипулятора. Под степенями подвижности манипулятора (степенями свободы) понимают обобщенные координаты, определяющие в пространстве положения его звеньев. Число степеней подвижности манипулятора  $W$  определяется по формуле:

$$W = 6k - \sum_{i=1}^5 P_i, \quad (19)$$

где  $k$  — подвижное число звеньев;  
 $P_i$  — число кинематических пар  $i$ -го класса.

Класс кинематической пары определяется количеством ограничений (связей), налагаемых на относительное движение звеньев. По характеру соприкосновения звеньев кинематические пары делятся на две группы: 1) контакт между звеньями осуществляется по поверхности — низшая кинематическая пара, 2) контакт по линии либо в точке — высшие кинематические пары. В низших кинематических парах, как правило, имеется геометрическое замыкание, а в высших парах — как геометрическое, так и силовое. Низшие пары способны передавать значительные нагрузки по сравнению с высшими, так как контактные напряжения в них ниже из-за поверхностного взаимодействия звеньев. Проектируемый манипулятор предполагается состоящим из трех вращательных одноподвижных кинематических пар, показанных на рис. 9.

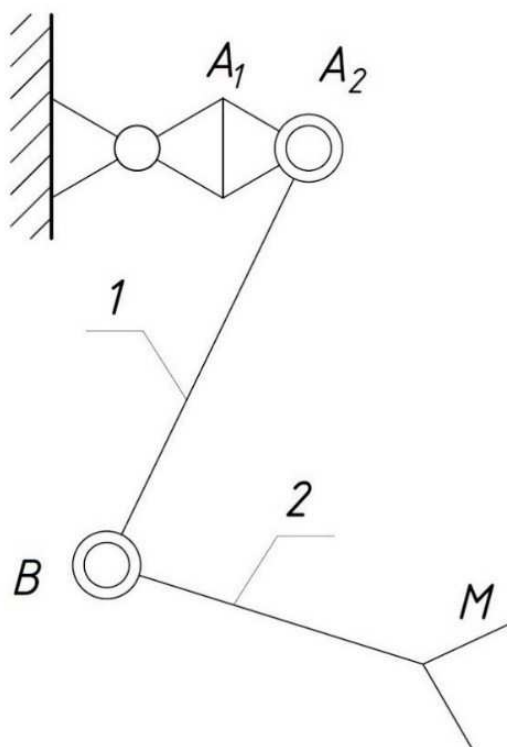


Рис. 9. Кинематическая схема манипулятора:

$A_1, A_2, B$  — вращательные кинематические одноподвижные пары;  $M$  — схват манипулятора; 1 — предплечье; 2 — кисть

Вращательные одноподвижные пары являются высшими и относятся к 5 классу. Однако совместно пары  $A_1$  и  $A_2$  образуют двухподвижную пару, которая относится к 4 классу. Так как количество звеньев равно двум, число степеней подвижности определяется как:

$$W = 6 \cdot 2 - 5 \cdot 1 - 4 \cdot 1 = 12 - 5 - 4 = 3. \quad (20)$$

Таким образом, механизм обладает тремя степенями свободы. Учитывая то, что две вращательные пары являются непараллельными, рабочая зона считается объемной.

Для того чтобы манипулятор выполнял необходимые функции, его движения не должны мешать работе АНПА в целом. Важно подобрать такие соотношения по массе и вылету между звеньями манипулятора, чтобы возникающие кренящие моменты во всех направлениях были минимальны (в идеале — нулевые). Для этого необходимо разместить точку крепления манипулятора, через которую проходит ось его вращения в горизонтальной плоскости, на одной вертикали с центрами тяжести и величины АНПА. При этом сумма моментов сил веса частей манипулятора относительно горизонтальной оси, проходящей через точку его крепления, при любом повороте манипулятора должна равняться нулю. Целесообразно разделить части манипулятора вертикальной осью таким образом, чтобы на каждую единицу длины количество массы по одну сторону от оси было равно такому же количеству массы по другую сторону:

$$M_1 x_1 = M_2 x_2, \quad (21)$$

где  $M_1, M_2$  — суммы масс по разные стороны от оси;  
 $x_1, x_2$  — координаты центров масс  $M_1$  и  $M_2$  соответственно.

Так как количество звеньев равно двум, то логично разбить длину на четыре части, где к первому звену будет относиться  $\frac{1}{4}$  длины, а ко второму —  $\frac{3}{4}$  длины. Для выполнения условия (6.2) при любом положении звеньев манипулятора необходимо равенство углов относительно дополнительной горизонтальной оси, проведенной из сочленения предплечья и плеча манипулятора (рис. 10).

На рис. 10 представлен схематический вариант компоновки манипулятора.

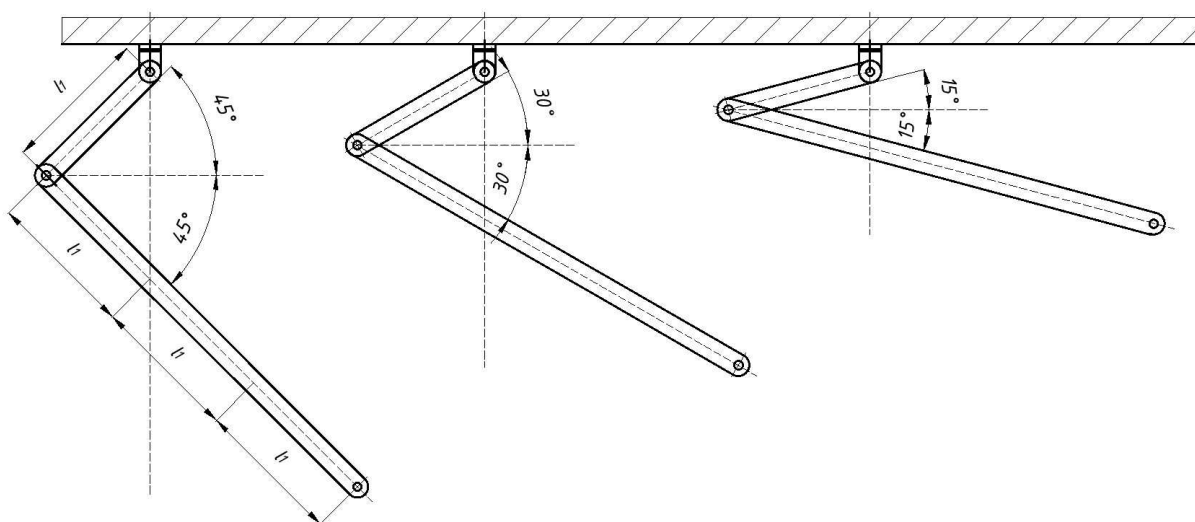


Рис. 10. Положение звеньев манипулятора при разной степени раскрытия

Данная схема позволяет вращать манипуляционный комплекс на 360 градусов без нарушения баланса. Предплечье и кисть представляют собой каркас из сплава В95.

Для приведения в движение исполнительного органа использованы электромеханические приводы, находящиеся в цилиндрических корпусах из сплава В95. Так как максимальная глубина погружения 3000 м, для обеспечения прочности корпуса должны быть заполнены практически несжимаемой неагрессивной и электропроводящей жидкостью, например маслом. Преимуществами электромеханических приводов является контролируемая плавность хода, а также отсутствие необходимости введения дополнительной системы (гидравлики, пневматики) для обеспечения движения манипулятора.

В качестве привода схвата был выбран отечественный привод от производителя KUBO. Приводы имеют широкую номенклатуру по габаритам и мощностям. Оснащены датчиками температуры и затекания воды, рассчитаны на давление до 120 МПа (расчетное для 3000 м в морской воде — 30,135 МПа).

В табл. 4 представлен расчет массы и длины плеч манипуляционного комплекса.

Таблица 4

Расчет массы и длины плеч манипуляционного комплекса

| Конструкция     |          | Масса оборудования, г |        | Моменты $x \cdot M$ |
|-----------------|----------|-----------------------|--------|---------------------|
| Длина, мм       | Масса, г | Привод                | Камера |                     |
| 240             | 575      | —                     | —      | 138000              |
| 240             | 575      | —                     | —      | 138000              |
|                 |          |                       |        | 276000              |
| 200             | 200      | —                     | —      | 40000               |
| 150             | 1573     | 1100                  | 392    | 235950              |
|                 |          |                       |        | 275950              |
| Общая масса, кг | 4,415    | Остаток               |        | 50                  |

На рис. 11 схематически показан общий вид манипуляционного комплекса.

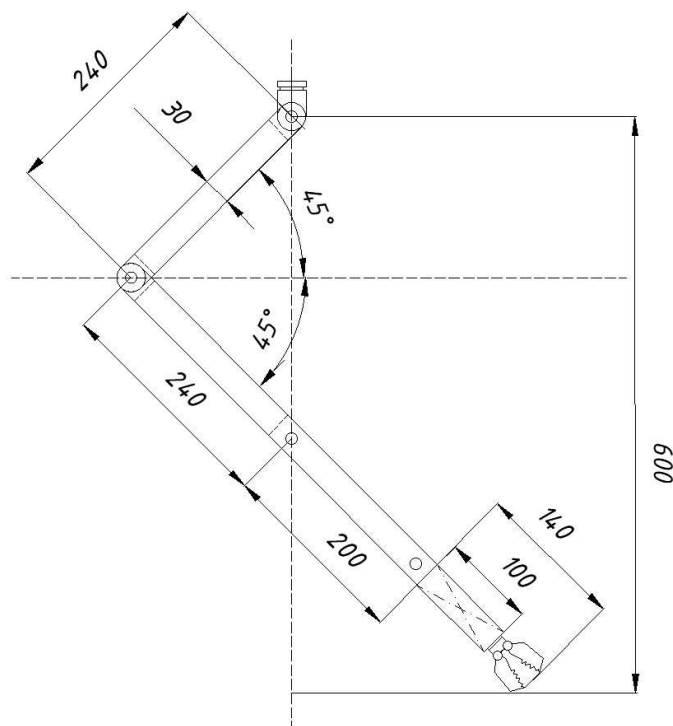


Рис. 11. Манипуляционный комплекс гибридного АНПА

Полученные значения характерных размеров достаточно точны (погрешность менее 0,02 %). Возможна дополнительная точная балансировка при помощи свинцовых грузов.

## АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ. ВЫВОДЫ

Учитывая существующие тенденции в освоении Мирового океана необходимо наращивать объемы проектирования и производства гибридных роботов.

Разработана классификация АНПА, позволяющая, с одной стороны, получить более точное представление о тех аппаратах, которые уже существуют, а с другой — понять, в каком направлении необходимо двигаться при проектировании новых.

Проведена оценка прочности корпуса, подкрепленного кольцевыми шпангоутами и без подкреплений, в ходе которой была выполнена проверка прочности по допускаемым напряжениям и проверка на устойчивость при действии максимального рабочего наружного давления. При проектировании глубоководных аппаратов целесообразно применение материалов с более высоким пределом текучести. При малых размерах шпации по технологическим соображениям целесообразно не подкреплять прочный корпус кольцевыми шпангоутами, компенсируя их отсутствие увеличением толщины оболочки или использованием более прочного материала.

При проектировании в соответствии с техническим заданием и с учетом данных прототипа задается диаметр прочного корпуса с учетом размеров контейнеров для размещения полезной нагрузки — аппаратуры. Их расчет выполняется по ГОСТ [8]. Для обечаек с внутренним диаметром менее 200 мм установка шпангоутов нецелесообразна. Для диаметров более 200 мм рекомендуется использовать кольцевые шпангоуты. При этом использование более прочных и, как следствие, дорогих материалов корпуса оправдано уникальностью АНПА при штучном и мелкосерийном производстве.

Использование САПР заметно облегчает разработку конструкций АНПА. Они позволяют достаточно точно определять массогабаритные характеристики (масса, центр тяжести всей конструкции и ее отдельных

элементов). Также инструменты САПР позволяют определять нагрузки, действующие на модель с точностью, соизмеримой с аналитическими методами расчета.

Манипуляционный комплекс аппарата следует располагать на днище аппарата под центром его тяжести. Плечи манипулятора должны быть взаимно уравновешены. При нарушении равновесия манипулятора относительно собственной системы координат (забор материала, непредусмотренное отклонение, вызывающее крен/дифферент) балансировка АНПА должна автоматически корректироваться дополнительной тягой маршевых двигателей и подруливающих устройств.

Таким образом, представленные аспекты позволяют дополнить, а следовательно, облегчить дальнейшую разработку такого нового объекта морской техники, как ГНПА.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобков В.А. Распознавание подводного трубопровода по стереоснимкам с борта АНПА в задачах инспекции подводных объектов / В.А. Бобков, М.А. Морозов, А.А. Шупикова, А.В. Инзарцев // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — Т. 3, № 3 (37). — С. 36 — 45.
2. Матвиенко Ю.В. Развитие технологического потенциала автономных необитаемых подводных аппаратов / Ю.В. Матвиенко, В.В. Костенко, А.Ф. Щербатюк, А.В. Ремезков // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — Т. 3, № 4 (34). — С. 4 — 14.
3. Коноплин А.Ю. Метод автоматической стыковки необитаемых подводных аппаратов с подводными платформами с использованием бортовых многозвенных манипуляторов / А.Ю. Коноплин, П.А. Пятавин // Подводные исследования и робототехника. — 2024. — №. 2 (48). — С. 38 — 47.
4. Kostenko V.V. Developing the multilink manipulator system for an autonomous underwater vehicle / V.V. Kostenko, A.Y. Bykanova, A.Y. Tolstonogov // International Conference on Ocean Studies (ICOS), 2022.
5. Киселев Л.В. Проблемно-ориентированная интегральная система управления движением и динамика гибридного АНПА в режиме контроля шумовой подводной обстановки / Л.В. Киселев, В.В. Костенко, А.В. Медведев, А.Ю. Быканова // Подводные исследования и робототехника. — 2023. — №. 4 (46). — С. 29 — 42.
6. [Freedom™ Autonomous Vehicle] [Электронный ресурс] URL: <https://www.oceaneering.com/rov-services/next-generation-subsea-vehicles/freedom/>
7. Медовник С.В. Аналитический обзор существующих автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) с манипулятором // Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы: м-лы рег. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов. Владивосток 18 декабря 2023 г. — 15 января 2024 г. / под общ. ред. Р.А. Полькова. [Электронное издание] — Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2024. — С. 410 — 416.
8. ГОСТ 52857.2-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. М.: Стандартинформ, 2009.
9. ГОСТ 4784-84 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997.
10. ГОСТ 26063-84 Роботы промышленные. Устройства захватные. Типы, номенклатура основных параметров, присоединительные размеры. М.: Изд-во стандартов, 1984.

## REFERENCES

1. Bobkov V.A., Morozov M.A., Shupikova A.A., Inzartsev A.V. Raspoznavanie podvodnogo truboprovoda po stereosnimkam s borta ANPA v zadachakh inspektzii podvodnykh ob"ektov [Recognition of an underwater pipeline from stereo images from the ANPA board in the tasks of inspection of underwater objects]. *Marine Intellectual Technologies*. 2021. Vol. 3, No. 3 (37): 36-45. (In Russ.)
2. Matvienko Yu.V., Kostenko V.V., Shcherbatyuk A.F., Remezov A.V. Razvitie tekhnologicheskogo potentsiala avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Development of technological potential of autonomous uninhabited underwater vehicles]. *Marine Intellectual Technologies*. 2020. Vol. 3, No. 4 (34): 4-14. (In Russ.)
3. Konoplin A.Yu., Pyatavin P.A. Metod avtomaticheskoi stykovki neobitaemykh podvodnykh apparatov s podvodnymi platformami s ispol'zovaniem bortovykh mnogozvennykh manipulyatorov [A method of automatic docking of uninhabited underwater vehicles with underwater platforms using on-board multi-link manipulators]. *Underwater Investigations and Robotics*. 2024. No. 2 (48): 38-47. (In Russ.)
4. Kostenko V. V., Bykanova A. Y., Tolstonogov A. Y. Developing the multilink manipulator system for an autonomous underwater vehicle. *International Conference on Ocean Studies (ICOS)*. 2022.
5. Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V., Bykanova A.Yu. Problemno-orientirovannaya integral'naya sistema upravleniya dvizheniem i dinamika gibridnogo ANPA v rezhime kontrolya shumovoi podvodnoi obstanovki [Problem-oriented integrated motion control system and dynamics of a hybrid ANPA in the underwater noise control mode]. *Underwater Investigations and Robotics*. 2023. No. 4 (46): 29-42. (In Russ.)
6. [Freedom™ Autonomous Vehicle] URL: <https://www.oceaneering.com/rov-services/next-generation-subsea-vehicles/freedom/>
7. Medovnik S.V. Analiticheskii obzor sushchestvuyushchikh avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov (ANPA) s manipulyatorom [Analytical review of the existing autonomous underwater vehicles (AUV) with manipulator]. *Nauka, tekhnika, promyshlennoe proizvodstvo: istoriya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy* [Science, Technology, Industrial Production: History, Current State, Prospects / ed. by R.A. Polkov. Electronic publication]. Vladivostok, 2024. (In Russ.)
8. GOST 52857.2-2007 — Vessels and apparatuses. Norms and methods of strength calculation. Calculation of cylindrical and conical shells, convex and flat bottoms and covers. 2009. (In Russ.)
9. GOST 4784-84 — Aluminum and aluminum deformable alloys. 1997. (In Russ.)
10. GOST 26063-84 — Industrial robots. Gripper devices. Types, nomenclature of basic parameters, connecting dimensions. 1984. (In Russ.)