

СТАНЦИЯ ПОДВОДНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ГИБРИДНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПОДВОДНОГО ДОБЫЧНОГО КОМПЛЕКСА

В.В. Костенко, А.Ю. Быканова, Д.Н. Михайлов, А.В. Ремезков

Использование обеспечивающих судов существенно увеличивает стоимость мониторинга объектов подводных добычных комплексов (ПДК), а наличие кабельной линии связи также существенно ограничивает возможность применения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА), которая сводится к нулю в условиях сплошного ледового покрытия района работ. Очевидной альтернативой использования ТНПА являются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), оснащенные оборудованием проведения контактных работ с объектами мониторинга, а также средствами связи с береговым постом управления (БПУ). При этом необходимая автономность использования таких гибридных необитаемых подводных аппаратов (ГНПА) может быть обеспечена сетью донных станций, оборудованных системами бесконтактного заряда и информационного обмена с БПУ ПДК. В работе предложена концепция станции подводного обслуживания (СПО) ГНПА, позволяющая в условиях долговременного подводного базирования использовать аппарат не только в автономном режиме, но и в режиме телеуправления от БПУ. Определены модель использования станции по назначению и состав необходимого для ее реализации оборудования, представлен конструктивный облик технического решения СПО, определенный с учетом особенностей установки на сложную донную поверхность и требований надежной стыковки ГНПА для бесконтактного заряда и информационного обмена, в том числе в режиме телеуправления от БПУ. Разработаны основные технические решения СПО, обеспечивающие автоматическую регулировку горизонтальности стыковочного узла, надежную стыковку и удержание терминалов заряда и информационного обмена ГНПА, контроль процесса наведения аппарата набором поворотных видеокамер со светильниками и гидролокатором секторного обзора.

Ключевые слова: станция подводного обслуживания, гибридный АНПА, донное базирование, автоматическое докование, подводный добычный комплекс.

Введение

Мониторинг подводных комплексов добычи нефти и газа при неблагоприятных погодных условиях и сплошном ледовом покрытии акватории, исключающих возможность использования ТНПА с обеспечивающим судном, может выполняться подводным робототехническим комплексом, состоящим из ГНПА, комплекта донных станций для долговременного базирования аппарата и системы энергоинформационной связи каждой станции с БПУ [1, 2] (см. рис. 1).

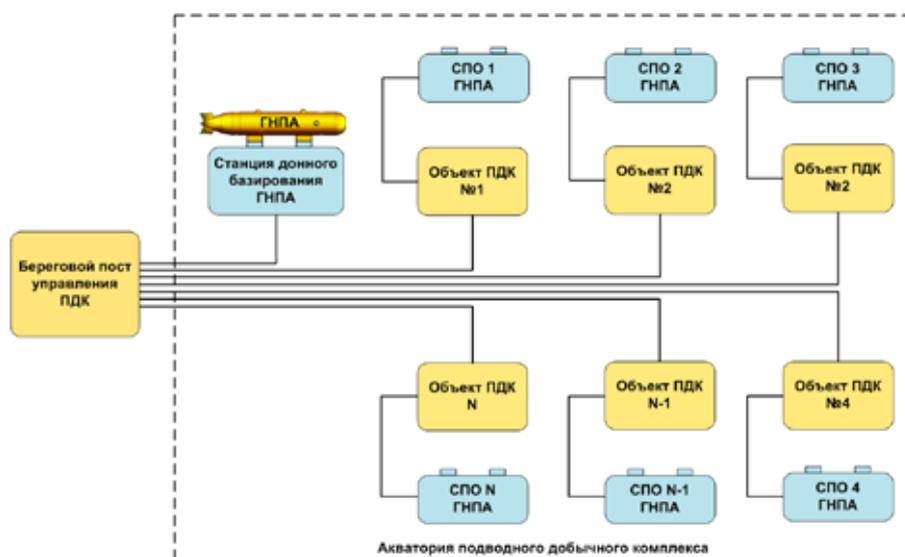


Рис. 1. Состав подводного робототехнического комплекса мониторинга объектов ПДК

Особое место в комплексе мониторинга ПДК занимает СПО, которая устанавливается в непосредственной близости от объекта работ и дает возможность использовать ГНПА как в автономном режиме, так и в режиме телеуправления через оптический кабель связи. При этом оператор БПУ может выполнять весь перечень работ по обслуживанию объекта ПДК бортовыми средствами ГНПА в режиме телеуправления без использования обеспечивающего судна. Постоянный мониторинг разветвленной сети объектов ПДК требует в окрестностях каждого из них расположить СПО и связать их кабельной системой с БПУ. Для получения возможности длительного автономного функционирования аппарата необходимо организовать бесконтактный заряд его аккумуляторных батарей и информационный обмен аппарата с БПУ. Кроме того, оборудование СПО должно обеспечивать автоматическую стыковку (докование) ГНПА с этой станцией, которая является одной из самых сложных подводных технологий.

Для ГНПА, вооруженного развитым ДРК с необходимым количеством подруливающих движителей, становится доступен режим динамического позиционирования в пространстве по всем шести степеням подвижности. При этом стыковка аппарата организуется, как правило, с горизонтальной площадкой доковой станции [3] с использованием сначала средств гидроакустической навигационной системы с короткой или ультракороткой базой, а затем навигационной стереовидеокамеры системы технического зрения аппарата с со-

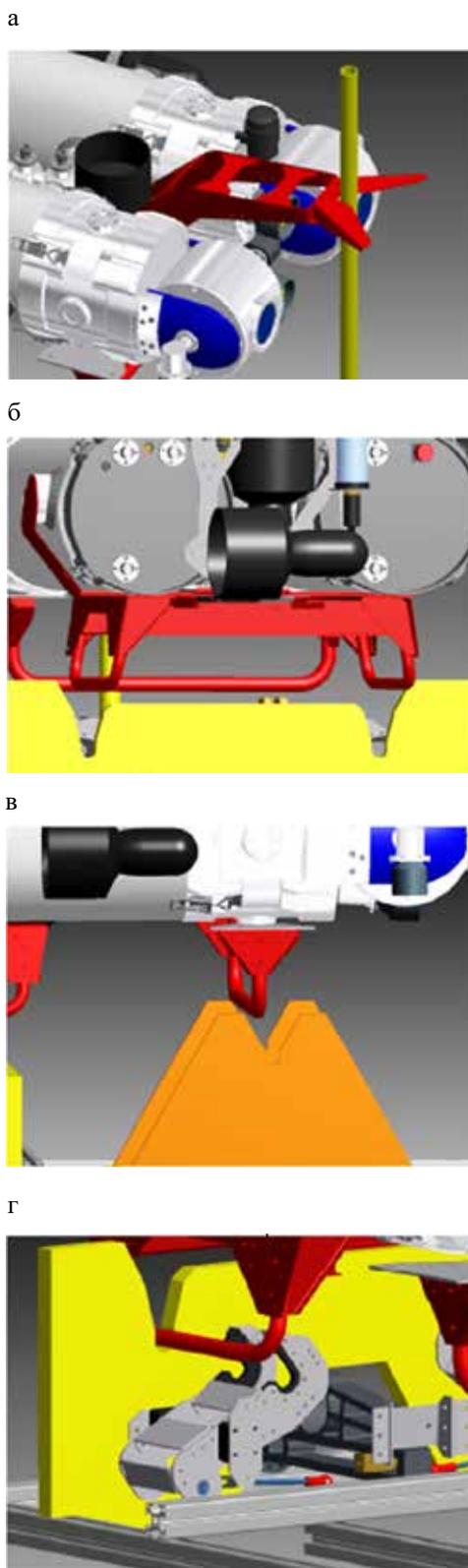


Рис. 2. Этапы стыковки ГНПА Dragon с доковой станцией:

а – контакт с вертикальной мачтой, б – вращательное выравнивание, в – продольное выравнивание, г – фиксация ГНПА

ответствующим программным обеспечением. Этапы процесса докования ГНПА Dragon к горизонтальной площадке доковой станции иллюстрирует рис. 2. Процесс выравнивания аппарата относительно доковой станции в режиме телеуправления показан на рис. 3.

В рамках программы THERMIE Европейская комиссия финансировала более сотни демонстрационных проектов в области энергетических технологий, одним из которых был SWIMMER (Subsea Work Inspection and Maintenance with Minimum Environment ROV). Проектом занимался консорциум Cybemetix, Ifremer, The University of Liverpool, TOTAL. SWIMMER Vehicle – это проект по разработке прототипа автономного подводного аппарата, способного быть носителем ТНПА рабочего класса для обслуживания ПДК без использования вспомогательных судов. Конфигурация развешивания устанавливает ТНПА над АНПА SWIMMER. При стыковке SWIMMER использует управляемые компьютером зажимы, которые позволяют дистанционно отсоединять ТНПА от SWIMMER, когда он находится на док-станции на морском дне. В этой конфигурации питание и связь подаются от доковой кабельной сети, что позволяет перезаряжать SWIMMER и дистанционно управлять ТНПА [4]. Конструктивный облик комплекса иллюстрирует рис. 4.

Норвежская международная энергетическая компания Equinor ASA совместно с Oceanering International Inc (США) в рамках Underwater Interventional Dron (UID) Strategy разработала иннова-

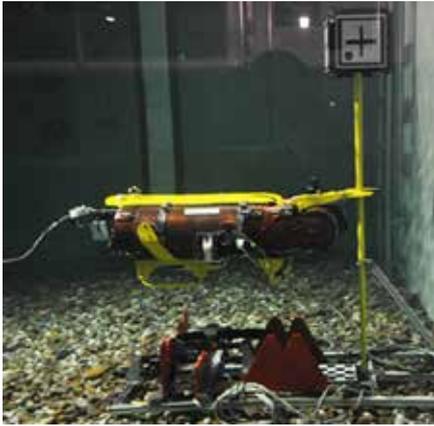


Рис. 3. Выравнивание ГНПА Dragon перед посадкой на доковую станцию

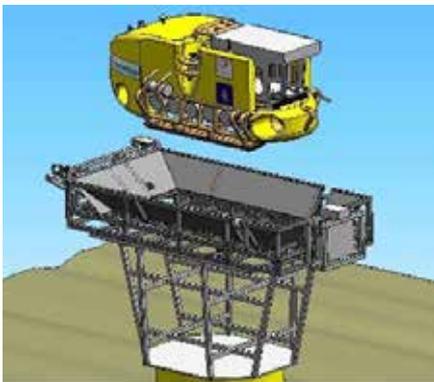


Рис. 4. Конструктивный облик подводного роботизированного комплекса SWIMMER

ционную донную станцию базирования специализированных ГНПА, предназначенных для мониторинга состояния и обслуживания объектов ПДК [5–7]. Ключевой особенностью доковой станции Equinor (см. рис. 5) является простота конструкции стыковочного узла, которая стала возможной благодаря способности садящихся на нее аппаратов двигаться в режиме динамического позиционирования по всем степеням подвижности. Впервые в мире в 2022 году компания Modus Smart Subsea Services (Англия) совершила успешную автономную стыковку одного из своих ГНПА с подводной стыковочной станцией Equinor в рамках финансируемого Equinor испытательного комплекса на северо-востоке Англии [8, 9]. АНПА Saab Sabertooth успешно состыковался с донной станцией без какого-либо вмешательства оператора, а вся операция контролировалась в режиме реального времени из Центра управления и контроля Modus, расположенного в Дарлингтоне.

Целью работы является определение основных технических решений донной станции, обеспечивающей увеличение автономности работы ГНПА, предназначенного для мониторинга объектов подводного добычного комплекса в автономном и те-



Рис. 6. Размещение ГНПА на UID subsea docking station: а – ГНПА SAAB Sabertooth на доковой станции, б – процесс автономной стыковки, в – центр управления и контроля Modus

леуправляемом режиме использования. Для достижения поставленной цели необходимо определить модель применения СПО, разработать конструктивный облик реализации основных элементов станции и алгоритмы взаимодействия аппарата со станцией.



Рис. 5. UID subsea docking station компании Equinor ASA (Норвегия)

1. Назначение и область применения станции подводного обеспечения

Разработка технических решений СПО выполнялась сотрудниками ИПМТ ДВО РАН по техническому заданию ДВФУ в рамках НИОКТР "Демонстратор технологий ГНПА" – подводного роботизированного комплекса, являющегося экспериментальной платформой для отработки и апробирования ключевых технологий, необходимых для выполнения работ по диагностике технического состояния и обслуживанию объектов ПДК, а также мониторингу загрязнения водной среды углеводородами в ледовых условиях на морских месторождениях нефти и газа. СПО устанавливается на донной поверхности в непосредственной близости к объекту обследования ПДК и соединяется с береговым постом управления посредством энергоинформационной кабельной сети.

В соответствии с моделью использования СПО предназначена для:

- размещения в районе расположения объекта обследования ПДК элементов систем связи (гидроакустической, оптической, кабельной), обеспечивающих возможность навигации ГНПА, его прецизионного подведения к СПО и управления подводным аппаратом как в автономном, так и супервизорном режимах работы;
- обеспечения автоматического докования ГНПА для стыковки с системами связи и энергоснабжения БПУ;
- зарядки аккумуляторных батарей ГНПА с использованием бесконтактных методов передачи энергии;
- обеспечения ГНПА каналами приема–передачи информации с БПУ.

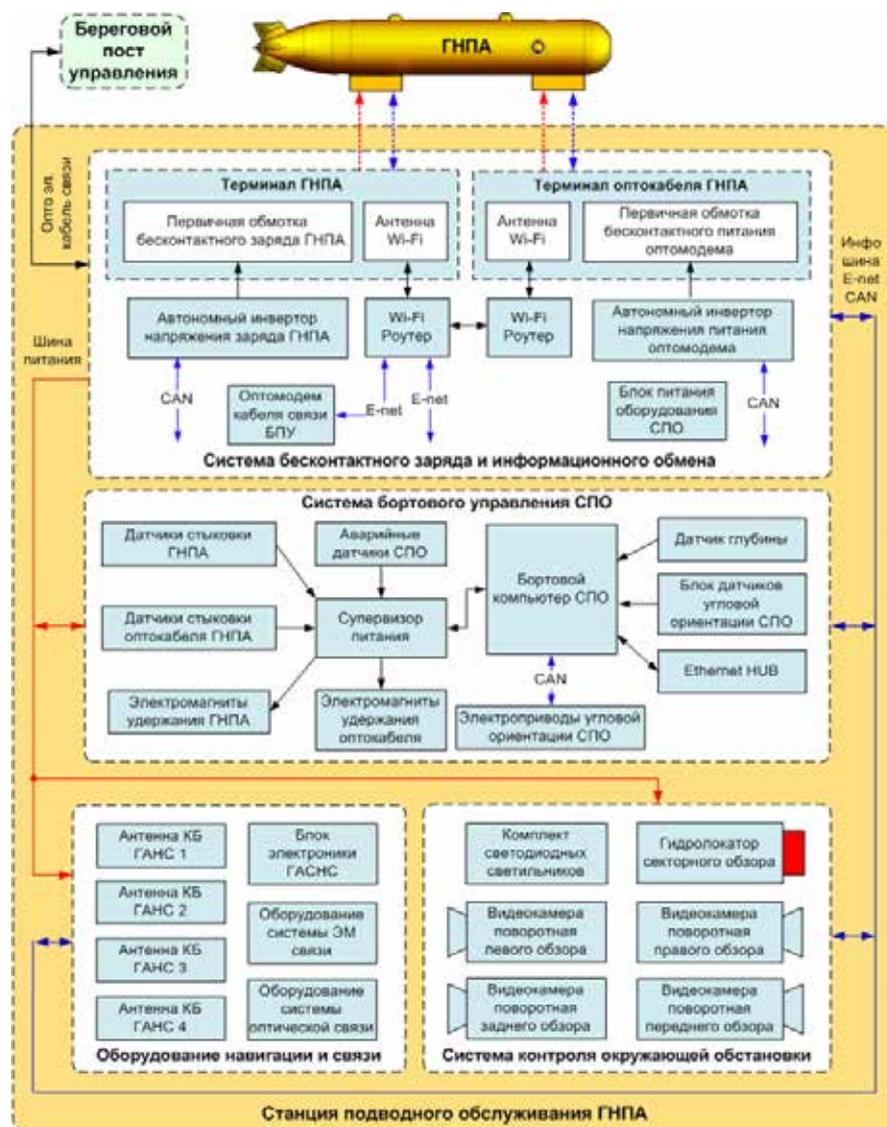


Рис. 7. Функциональная схема СПО ГНПА

В результате анализа требований по назначению был определен следующий состав СПО, взаимодействие которого иллюстрирует функциональная схема станции рис. 6:

- пространственная несущая конструкция;
- система бесконтактного заряда и информационного обмена ГНПА;
- система бортового управления СПО;
- элементы системы связи и навигации;
- система контроля окружающей обстановки.

2. Описание и обоснование принятых технических решений СПО

А. Конструктивный облик СПО

В соответствии с требованиями по назначению СПО, а также с учетом характеристик оборудования был определен конструктивный облик станции, приведенный на рис. 8.

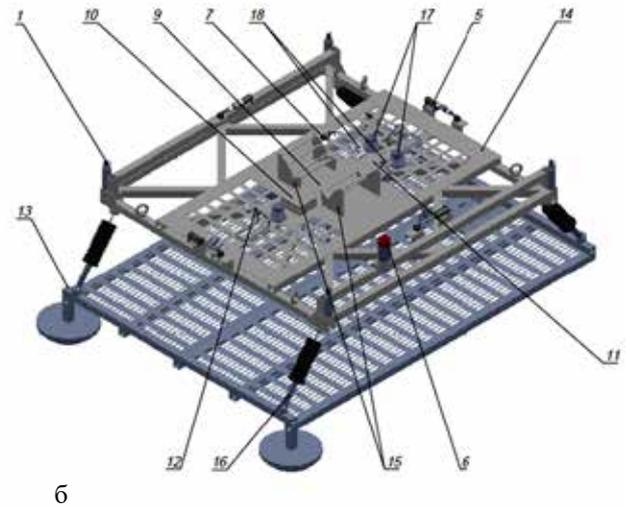
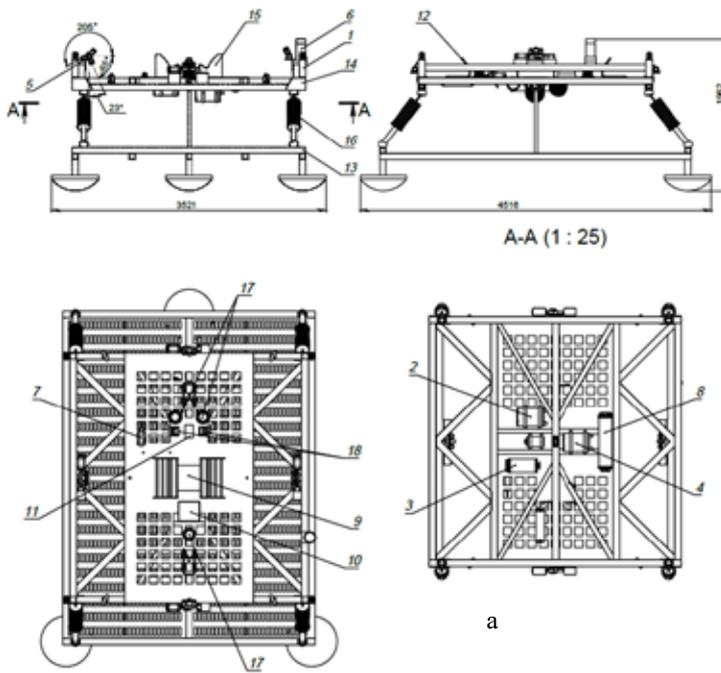


Рис. 8. Конструктивный облик СПО: а – чертеж общего вида, б – 3D модель

На рис. 8 приняты следующие обозначения: 1 – антенны гидроакустической системы навигации и связи (ГАСНС) (4 шт.), 2 – блок электроники системы бесконтактного заряда и информационного обмена, 3 – блок электроники оборудования навигации и связи, 4 – блок электроники бесконтактного информационного обмена терминала кабеля связи ГНПА, 5 – видекамера поворотная (снабжена приводом поворота в вертикальной плоскости и светильниками), 6 – гидролокатор секторного обзора (ГСО), 7 – датчик глубины погружения, 8 – блок электроники системы бортового управления СПО, 9 – видеомаркер для наведения ГНПА при посадке, 10 – терминал бесконтактного заряда и информационного обмена ГНПА, 11 – терминал бесконтактного информационного обмена с оптоволоконным кабелем ГНПА, 12 – ограничитель продольного смещения ГНПА при посадке, 13 – основание СПО, 14 – стыковочный модуль ГНПА, 15 – направляющие поперечной ориентации ГНПА при посадке, 16 – электроприводы регулиров-

ки углового положения стыковочного модуля ГНПА, 17 – электромагниты удержания ГНПА на стыковочном модуле СПО (3 шт.), 18 – электромагниты удержания терминала оптокабеля связи ГНПА.

Б. Базовая конструкция СПО

Основное требование к конструкции СБО заключается в обеспечении надежной посадки ГНПА, имеющего близкие нулю углы крена и дифферента, на стыковочный модуль станции. При этом возникает необходимость в регулировке горизонтальности этого модуля при постановке станции на донную поверхность произвольного профиля. Основой конструкции станции является пространственная ферма, состоящая из основания и рамы. На рис. 9 иллюстрируется принятое техническое решение для регулировки горизонтального положения стыковочного модуля ГНПА.

Из рис. 8 и 9 видно, что станция в нижней части снабжена тремя полусферическими элементами, вы-

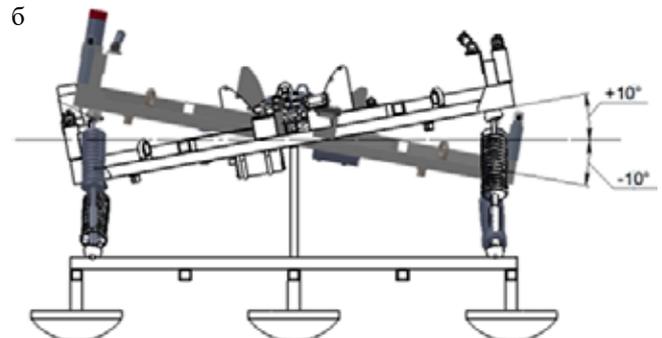
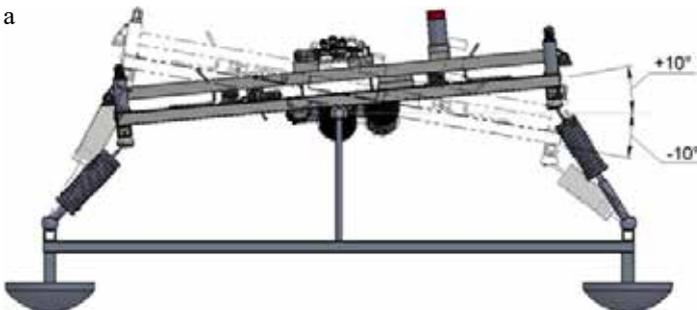


Рис. 9. Регулировка угловой ориентации стыковочного модуля ГНПА: а – по дифференту, б – по крену

полняющими функцию опор и якорей, а также задающими плоскость базирования. При первичной установке станции на дно плоскость стыковочного модуля с большой степенью вероятности не будет горизонтальна. Это не только значительно усложнит процесс стыковки и фиксации ГНПА с нулевыми углами статического крена и дифферента на станции, но и может привести к недопустимым значениям зазоров между терминалами бесконтактного заряда/питания и информационного обмена.

Автоматическую регулировку горизонтального положения стыковочного модуля производят с помощью четырех встроенных приводов в соответствии с показаниями размещенных на модуле датчиков угловой ориентации. При этом курсовой угол установки платформы не регулируется, но его значение измеряется соответствующим датчиком системы бортового управления СПО. Управление стыковкой подводного аппарата со станцией производится с учетом показаний датчиков ее угловой ориентации. Вследствие возможной подвижки грунта под опорами СПО регулировка ориентации стыковочного модуля необходима не только во время постановки станции на грунт, но и в течение всего периода ее эксплуатации. При этом телескопические звенья целесообразно реализовать на базе электрических приводов с механической передачей винт–гайка для обеспечения самоторможения, что важно для обеспечения стабильного положения платформы в случае отключения электропитания. Таким образом, станция представляет собой подвижный двухступенный параллельный механизм.

В. Устройства стыковки ГНПА

Энергоинформационное взаимодействие станции с ГНПА организовано через два терминала. Один из них предназначен для подзарядки аккумуляторных батарей аппарата, передачи на БПУ данных, полученных в ходе выполнения автономной миссии по обследованию объектов ПДК, а также получения но-

вого маршрутного задания на обследование в автономном режиме. Второй терминал обеспечивает работу ГНПА в привязном режиме с информационным обменом БПУ и аппарата через оптический кабель связи. Кроме того, через этот терминал происходит подача питания на оптомодем корневого конца оптоволоконного кабеля, зафиксированного на станции.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что для качественной работы системы бесконтактной передачи энергии и информационного обмена допустимый зазор между терминалами должен быть не более 5 мм, а ошибка позиционирования в горизонтальной плоскости не должна превышать ± 2 мм [10, 11]. Такую точность позиционирования ГНПА относительно стыковочного модуля сложно обеспечить доступным навигационным оборудованием или системой технического зрения аппарата. Кроме того, очевидный вклад в погрешность позиционирования вносят нелинейности характеристик движительно-рулевого комплекса. В связи с этим были разработаны и предлагаются к дальнейшей реализации механические устройства, ориентирующие ГНПА относительно стыковочного модуля на конечном этапе докования аппарата.

Стыковка подводного аппарата с донной станцией является одной из самых сложных подводных технологий. В литературе отражена эта трудность: в большинстве статей тестируются те или иные элементы стыковки, и лишь в нескольких из них сообщается о результатах натурных испытаний. Имеющиеся публикации о полном комплексе стыковки, включая перезарядку аккумуляторов, сброс данных и иницирование новых миссий НПА, сообщают о результатах для сравнительно коротких временных интервалов развертывания. Следовательно, можно сделать вывод о том, что на данный момент технология стыковки НПА с донной станцией еще не совершила перехода от демонстрации к эксплуатации [12–20].

Наиболее эффективным средством точной стыковки ГНПА и СПО являются направляющие устрой-

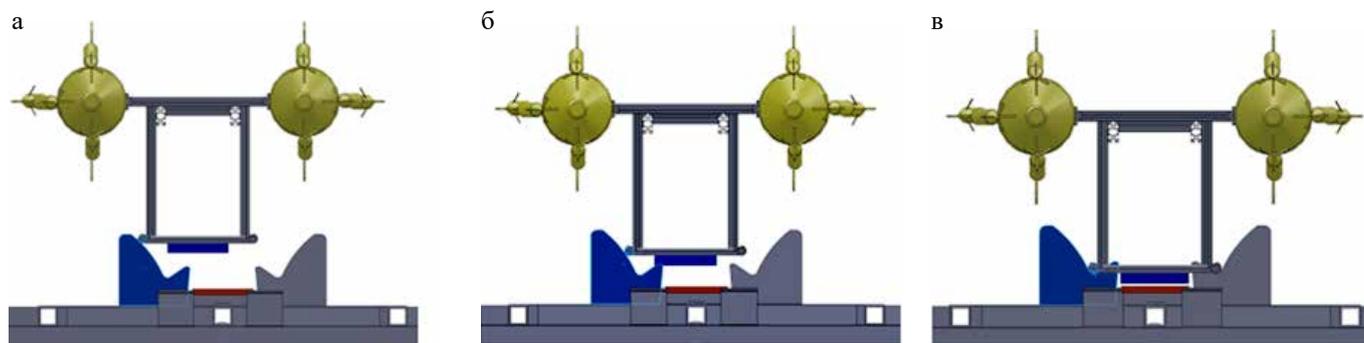


Рис. 10. Этапы поперечного выравнивания ГНПА на стыковочном модуле: а – начальный, б – промежуточный, в – финальный

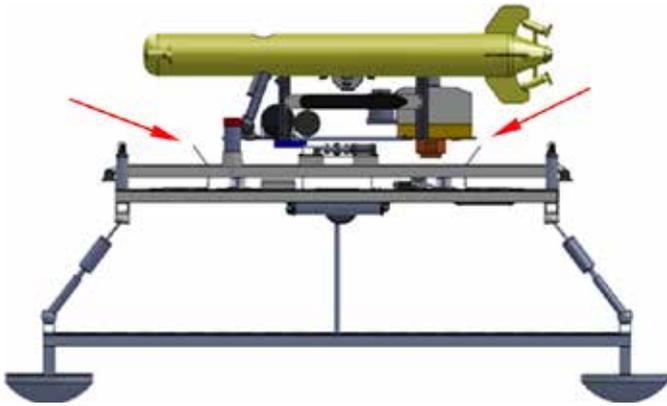


Рис. 11. Продольное выравнивание ГНПА ограничителями стыковочного модуля

ства и ограничители, которые представляют собой конструкции по типу видоизмененной направляющей призмы, используемой в металлообработке. Примером реализации подобного подхода является стыковочное устройство ГНПА Dragon (см. рис. 2 и 3). Крепление разработанной конструкции стыковочного устройства предлагаемой СПО иллюстрирует рис. 8. Этапы работы направляющих устройств в процессе посадки аппарата на стыковочный модуль СПО показаны на рис. 10 и 11.

Г. Устройства удержания ГНПА и терминала кабеля связи

Для фиксации ГНПА на стыковочном модуле СПО предложено использовать электромагниты (ЭМ), которые включаются оператором БПУ после срабатывания датчиков посадки аппарата. Технология применения и изготовления подобных устройств давно изучена и успешно внедрена в практику подводной робототехники для удержания аварийного балласта всплытия АНПА. Расположение ЭМ на



Рис. 12. Расположение ЭМ удержания на стыковочном модуле СПО

стыковочном модуле станции выбрано таким образом, чтобы обеспечивать надежное удержание ГНПА с помощью трех магнитов, показанных на рис. 12.

Узел стыковки с терминалом оптокабеля связи ГНПА спроектирован идентичным с гнездом посадки этого узла в систему кабельной связи аппарата. Конструктивный облик терминала оптокабеля связи показан на рис. 13.

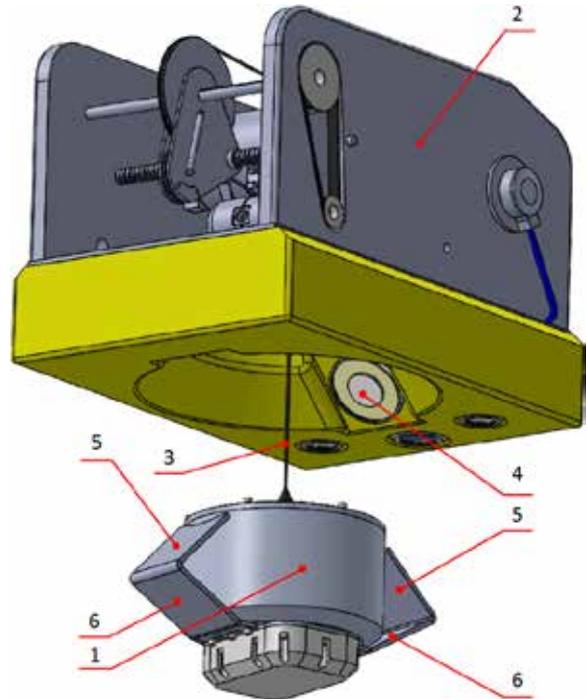


Рис. 13. Система кабельной связи ГНПА: 1 – терминал кабеля связи, 2 – модуль системы кабельной связи ГНПА, 3 – оптический кабель связи, 4 – ЭМ удержания терминала, 5 – сердечник ЭМ ГНПА, 6 – сердечник ЭМ СПО

В связи с тем, что для обеспечения электромагнитного захвата необходимым условием является строгая параллельность стыкующихся плоскостей, было принято решение выполнить постановку ЭМ на станцию с возможностью их небольшого люфта, который в итоге позволит сориентировать плоскость ЭМ параллельно с взаимодействующим сердечником на аппарате или терминале. Конструктивно это решение реализовано расположением ЭМ на пружинном основании, как показано на рис. 14.



Рис. 14. Модель ЭМ на пружинном основании

Д. Система контроля окружающей обстановки

Система контроля окружающей обстановки (СКОО) представляет собой развитую многокомпонентную систему, позволяющую не только производить мониторинг процесса постановки станции на грунт, но и корректировать подход и стыковку ГНПА. Так оператор БПУ при движении аппарата в телеуправляемом или супервизорном режиме имеет возможность координировать процесс наведения и стыковки ГНПА. В состав СКОО входят четыре поворотные видеокамеры по сторонам станции, оснащенные светильниками, а также ГСО. Было принято следующее размещение видеокамер по периметру модуля стыковки ГНПА: видеокамеры левого и правого обзора установлены в центре левого и правого бортов модуля соответственно. Видеокамеры переднего и заднего обзора – в центре передней и задней частей модуля соответственно. При этом электроприводы позволяют осуществлять независимый поворот видеокамер в вертикальной плоскости в диапазоне

Таблица 1. Основные характеристики используемой видеокамеры

Наименование характеристики	Значение
ПЗС-матрица	1/3" 1,3 megapixel CMOS
Разрешение	1280*960 (720P@25fps)
Освещенность	Color 0,3 Lux F/1.2 – B/W 0,01 Lux F/1,2
Объектив	1 Vg 3,6 mm (M12) 72°H
Габариты ДхШхВ	38x38x50 мм
Интерфейс связи видеокамеры	Ethernet

0–270°, что обеспечивает, с одной стороны, видеоконтроль подхода ГНПА на подступах к СПО по периметру, а с другой стороны – детальный видеоконтроль процесса докования аппарата. Конструктивный облик модуля видеокамеры иллюстрирует рис. 15, а в табл. 1 сведены основные характеристики предлагаемой IP видеокамеры. Зоны видения видеокамер показаны на рис. 16.

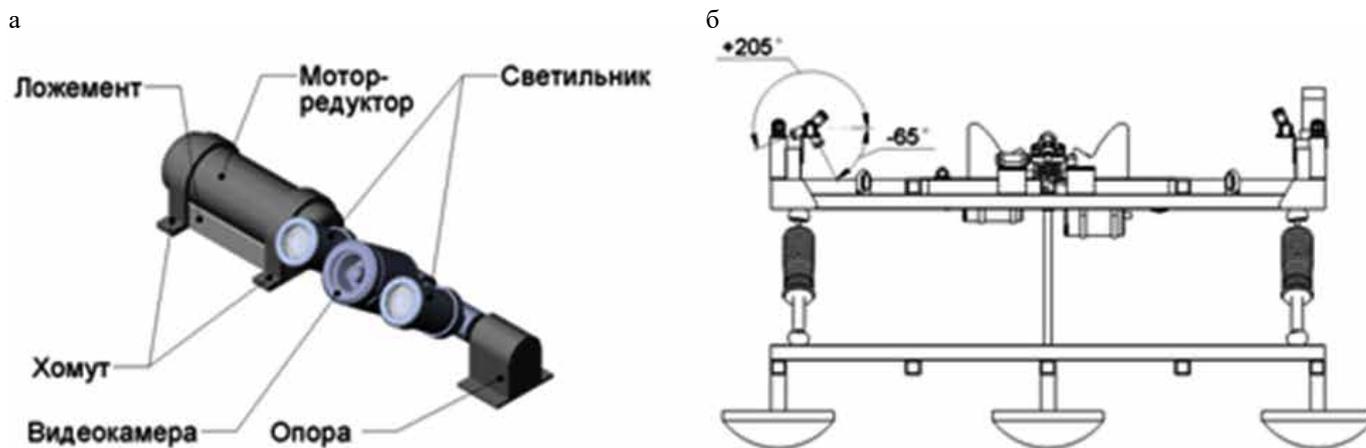


Рис. 15. Модуль видеокамеры:
а – конструктивный облик, б – диапазон регулирования угла поворота

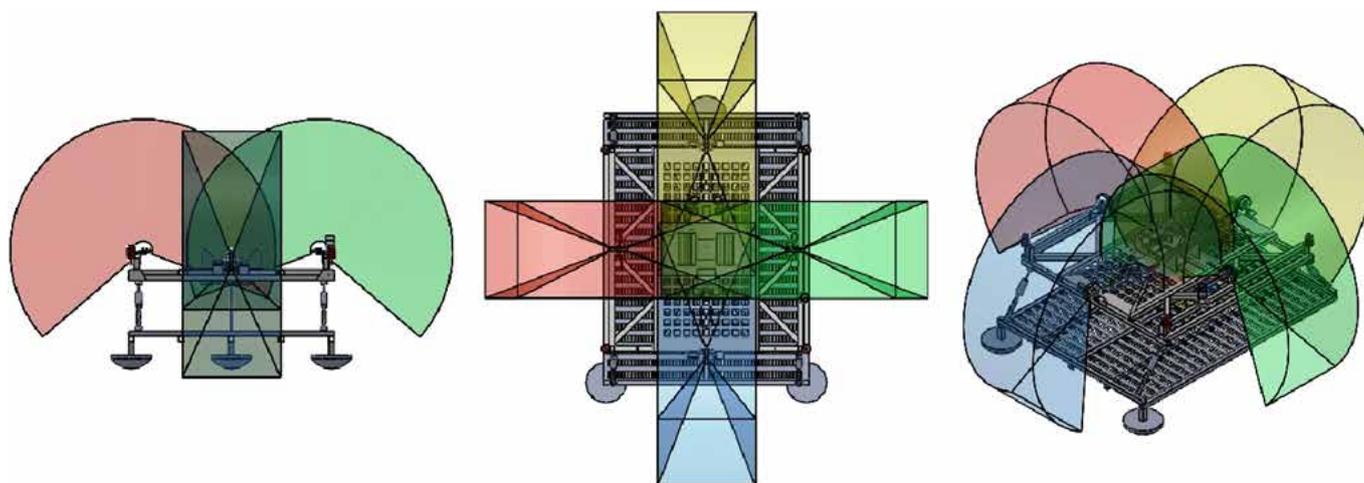


Рис. 16. Зоны видения видеокамер контроля окружающей СПО обстановки

Включенный в состав СКОО ГСО решает задачу обнаружения ГНПА на дальностях от СПО, превышающих дальность видеоконтакта, которая, как правило, ограничена дистанцией 2–3 м. При этом на аппарате желательна установка уголкового отражателя, использование которых существенно увеличит дальность обнаружения и точность угла пеленга. Кроме того, на основании определенных с помощью ГСО наклонной дальности и угла пеленга оператор БПУ может определять координаты аппарата относительно станции, а также управлять его сближением на дальностях до 200 м через команды изменения курса, глубины погружения и скорости хода по низкоскоростному гидроакустическому каналу телеуправления ГАСНС. Таким образом, ГСО является альтернативным устройством координирования движения аппарата, которое увеличивает эксплуатационную надежность совместного использования ГНПА и СПО. На основании имеющегося в ИПМТ ДВО РАН положительного опыта использования был выбран гидролокатор Imagenex 881L Digital Multi-Frequency Imaging Sonar от компании Imegenex

Technology Corp. (Канада), характеристики которого приведены ниже. В соответствии с характеристиками ГСО (табл. 2) была определена его зона сканирования, показанная на рис. 17.

Е. Система бесконтактного заряда и информационного обмена

Развернутые результаты разработки системы бесконтактного заряда и информационного обмена СПО представлены в статье «Организация энергетического и информационного взаимодействия берегового поста управления с ГНПА при обслуживании подводных добычных комплексов» этого номера журнала.

3. Взаимодействие СПО и ГНПА в автономном режиме

Взаимодействие ГНПА и СПО в автономном режиме происходит в три этапа: автоматический подход и докование, заряд и информационное взаимодействие с БПУ, расстыковка и переход в автономный режим работы для выполнения нового маршрутного задания.

На первом этапе ГНПА в автономном режиме подходит к СПО по целеуказанию сначала ГАСНС, а затем СКОО станции (видеокамеры по периметру и ГСО в режиме кругового обзора). При этом у оператора БПУ имеется возможность корректировать положение аппарата относительно станции, подавая целевые значения курса, глубины и скорости хода через низкоскоростной гидроакустический канал телеуправления от БПУ. В результате этой корректировки устанавливается захват стереовидеокамерой аппарата маркера, закрепленного в центре стыковочного модуля станции. Далее осуществляется автоматическая посадка ГНПА на станцию с целеуказанием от бортовой стереовидеокамеры. После срабатывания датчиков стыковки ГНПА автоматически включаются ЭМ его удержания и проверяется наличие заряда аккумуляторных батарей ап-

Таблица 2. Основные характеристики ГСО Imagenex 881L

Наименование характеристики	Значение
Рабочая частота, кГц	280–1100
Ширина диаграммы направленности	4°×40° (310 кГц); 1,8°×20° (675 кГц); 0,9°×10° (1 МГц)
Разрешающая способность по дальности, м	0,002 (до 4 м); 0,010 (от 5 м)
Зона нечувствительности, м	0,150
Максимальная дальность, м	200
Предельная рабочая глубина, м	1000 м
Интерфейс	Ethernet (10BASE-T), протокол TCP/IP
Напряжение питания, В	20–36
Потребляемая мощность (не более), Вт	5
Вес на воздухе/в воде, кг	1,5/0,6
Габаритные размеры, мм	диаметр – 79,4, длина – 182

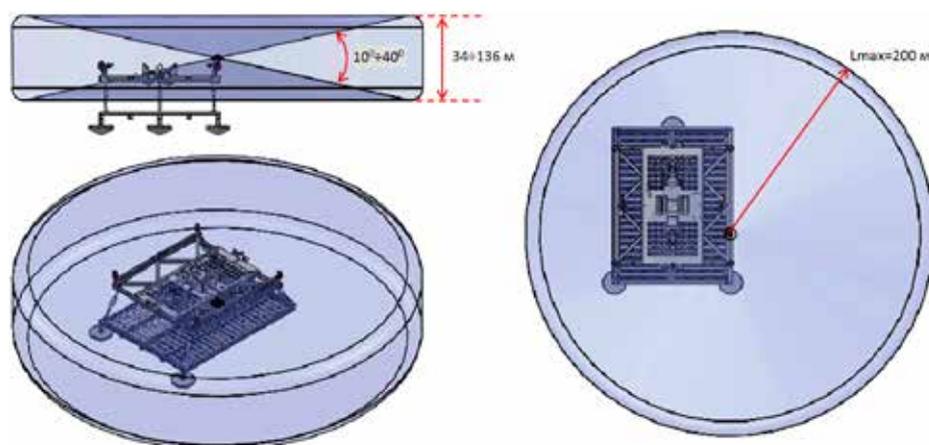


Рис. 17. Зона сканирования ГСО окрестностей СПО

парата и качество информационного обмена между ГНПА и БПУ.

На втором этапе происходит бесконтактный заряд аккумуляторных батарей, считывание накопленных в результате выполненной ранее автономной миссии данных гидролокационной и фотосъемки, тестирование и диагностика систем аппарата, а также получение нового маршрутного задания.

На рис. 18 иллюстрируется подход ГНПА к СПО в автономном режиме, а на рис. 19 – положение ГНПА на станции после стыковки. Следует отметить, что посадка аппарата на стыковочный модуль СПО возможна только при строго определенной взаимной ориентации ГНПА и станции по курсу.

4. Взаимодействие СПО и ГНПА в привязном режиме

Особенность взаимодействия ГНПА и СПО в привязном режиме обусловлена наличием кабельной линии связи между ними и происходит в следующей последовательности: автоматический подход аппарата и докование, стыковка и удержание терминала оптокабеля, уход от станции к объекту работ и маневрирование возле него в режиме телеуправления, возвращение к станции в режиме телеуправления, докование в режиме телеуправления с последующим зарядом аккумуляторных батарей и тестированием бортового оборудования.

Рис. 18. Подход ГНПА к СПО в автономном режиме

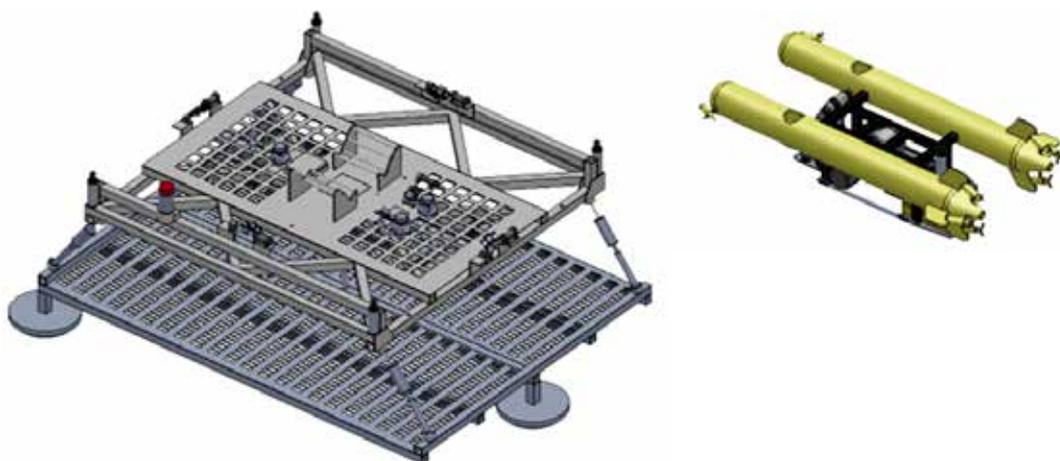
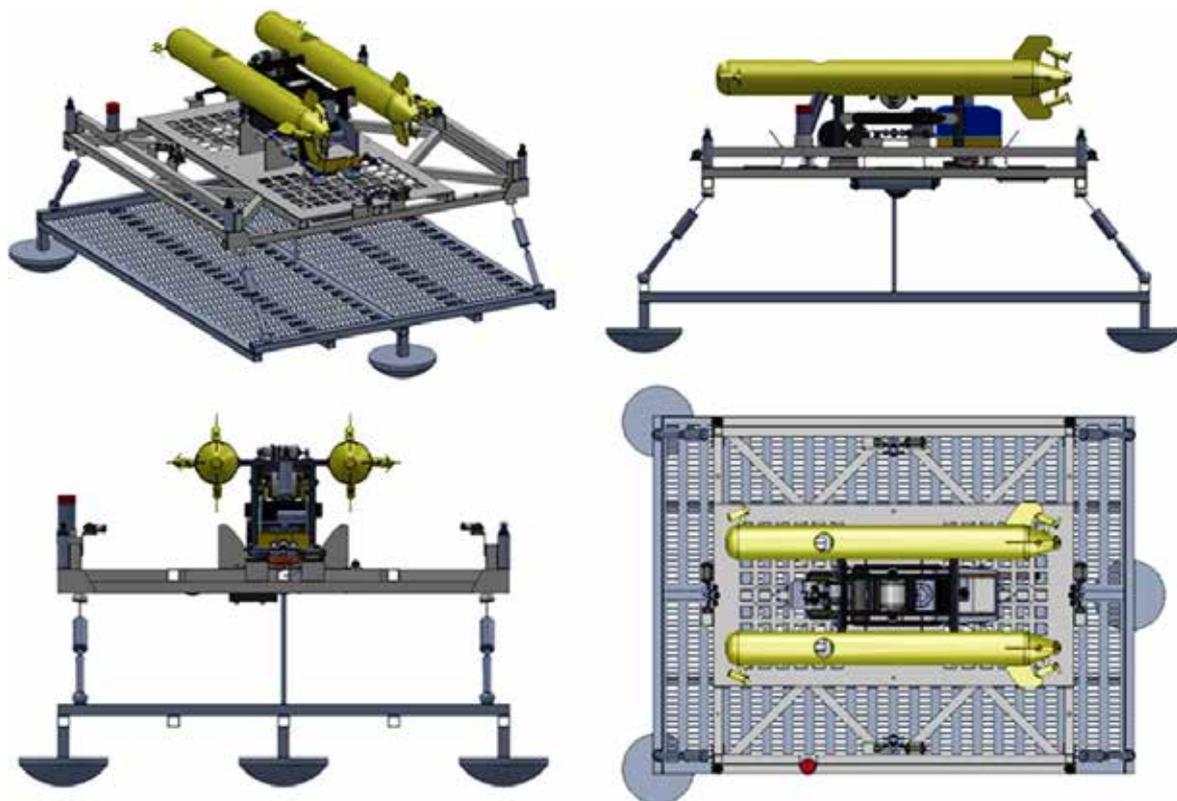


Рис. 19. Положение ГНПА в состыкованном с СПО состоянии



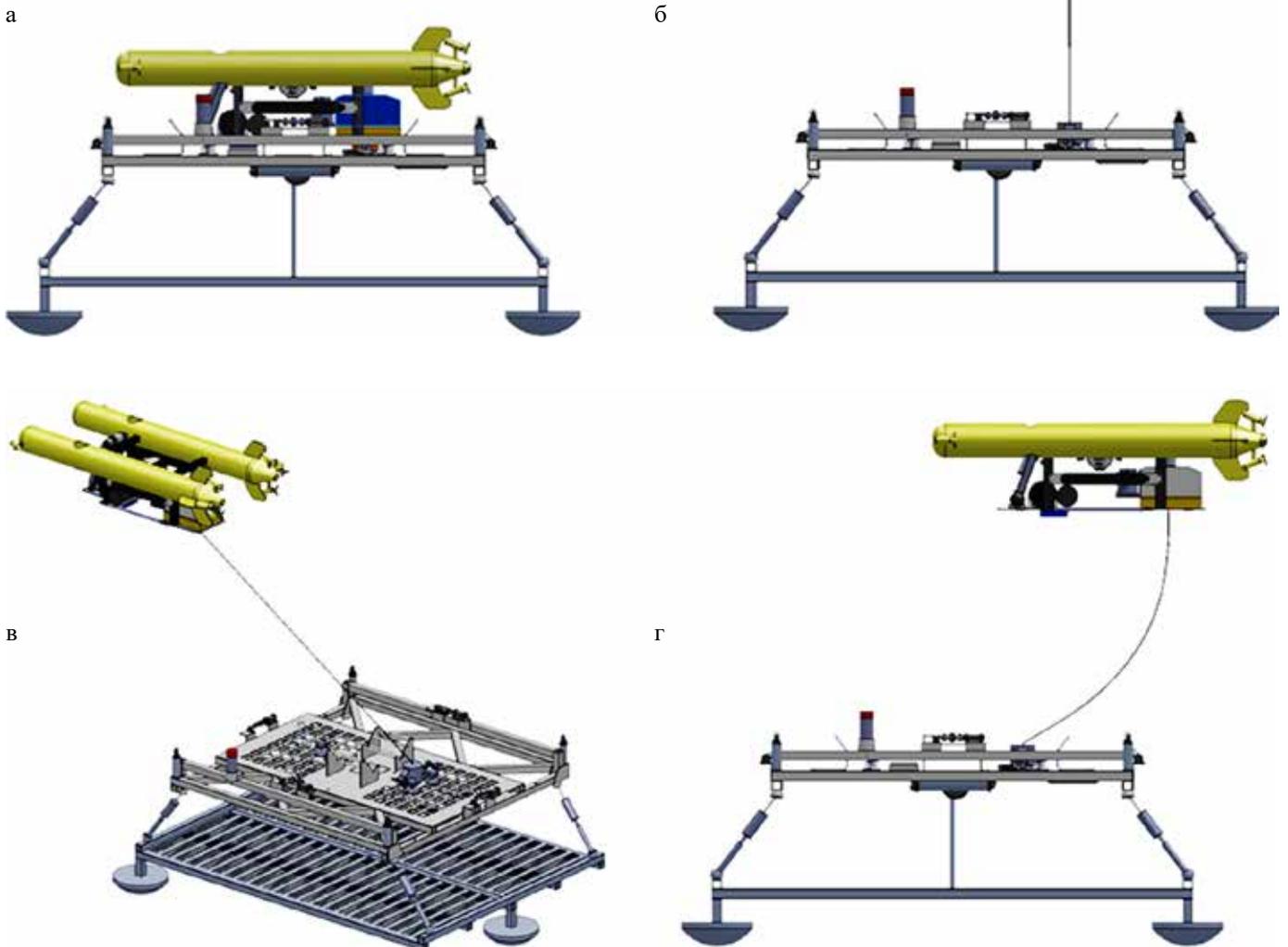
На первом этапе ГНПА в автономном режиме подходит к СПО по целеуказанию сначала ГАСНС, а затем видеокамер по периметру и ГСО в режиме кругового обзора. При этом имеется возможность корректировать положение аппарата относительно станции через низкоскоростной гидроакустический канал телеуправления от БПУ. В результате этой корректировки устанавливается захват стереовидеокамерой аппарата маркера стыковочного модуля станции. Далее осуществляется автоматическая посадка ГНПА на станцию по целеуказанию от стереовидеокамеры.

На втором этапе после срабатывания датчиков стыковки терминала оптокабеля автоматически включаются ЭМ его удержания и проверяется на-

личие и качество информационного обмена между ГНПА и БПУ, включаются ЭМ удержания аппарата и бесконтактный заряд аккумуляторных батарей. Данное положение аппарата иллюстрирует рис. 20, а. По завершению заряда и подтверждению необходимого качества информационного обмена ГНПА становится телеуправляемым аппаратом с кабельной линией связи, длина которой позволяет выполнять необходимые инспекционные работы в окрестностях СПО.

На третьем этапе после полного заряда аккумуляторных батарей по командам оператора БПУ отключаются электромагниты удержания ГНПА и происходит вертикальное всплытие аппарата над станцией на высоту 3–5 м (см. рис. 20, б). Аппарат движется

Рис. 20. Взаимодействие ГНПА и СПО в привязном режиме: а – исходное состояние ГНПА на СПО, б – вертикальное всплытие над СПО, в – движение от СПО к объекту работ, г – возвращение от объекта работ на СПО



на некоторой высоте над грунтом к объекту работы, преодолевая небольшое натяжение кабеля (см. рис. 20, в). При этом лебедка системы кабельной связи ГНПА автоматически поддерживает целевое значение выпущенной длины кабеля, соответствующее координатам аппарата относительно стыковочного модуля станции. Кроме длины система кабельной связи аппарата контролирует натяжение кабеля, а также скорость изменения его длины. После выхода на объект работ лебедка останавливается, а аппарат снижается на требуемую для работ высоту. С учетом отрицательной плавучести грузонесущего оптокабеля допускается только локальное маневрирование аппарата в горизонтальной плоскости для того, чтобы исключить зацепы кабеля за донные объекты.

На четвертом этапе по завершению маневрирования возле объекта ГНПА по команде оператора БПУ всплывает строго вертикально на высоту, обеспечивающую гарантированный подъем выпущенного кабеля отрицательной плавучести над грунтом. После всплытия ГНПА бортовая лебедка работает на выборку, а аппарат стабилизируется на заданной глубине и подтягивается к СПО за счет регулируемого натяжения кабеля связи и малого собственного хода.

На пятом этапе оператор БПУ в режиме телеуправления осуществляет посадку аппарата на стыковочный модуль СПО, после срабатывания датчиков стыковки включает ЭМ удержания ГНПА, подключает бесконтактный заряд аккумуляторных батарей. Далее в зависимости от сценария работы можно повторить работу с объектом в режиме телеуправления или принять новое маршрутное задание и перейти в автономный режим работы.

Заключение

В результате проведенных исследований определена концепция СПО ГНПА для мониторинга объектов ПДК, позволяющая в условиях долговременного подводного базирования применять аппарат не только в автономном режиме, но и в режиме телеуправ-

ления от БПУ. При этом были получены следующие основные результаты:

1. В ходе анализа выполняемых СПО функций определена модель ее использования по назначению и состав оборудования основных систем, разработана функциональная схема станции.

2. Представлен конструктивный облик станции, обеспечивающий возможность ее устойчивого размещения на сложной донной поверхности.

3. Разработаны техническое решение и конструкция стыковочного узла станции с автоматической стабилизацией горизонтального положения, обеспечивающего надежную стыковку терминалов бесконтактного энергоснабжения и информационного обмена ГНПА. Для надежного удержания ГНПА и терминала кабеля связи с аппаратом на стыковочном модуле предусмотрены ЭМ, управляемые оператором БПУ.

4. Определены состав и характеристики системы контроля окружающей обстановки, обеспечивающей наведение подводного аппарата к стыковочному модулю станции с произвольного направления и средства видеоконтроля процесса посадки. В состав системы включены четыре поворотных в вертикальной плоскости видеокамеры со светильниками и многочастотный ГСО с максимальной дальностью 200 м и разрешением по дальности не хуже 0,01 м.

5. Для увеличения дальности обнаружения ГНПА и точности измерения угла пеленга предложено оборудовать аппарат набором компактных угловых отражателей.

6. Разработаны алгоритмы взаимодействия СПО и ГНПА для автономного и управляемого через оптоволоконный кабель связи режимов работы аппарата.

Работа выполнена по теме государственного задания ИМТП ДВО РАН «Исследование и разработка принципов и методов создания многофункциональных робототехнических комплексов для изучения и освоения Мирового океана», № государственной регистрации 121030400088-1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвиенко Ю.В., Костенко В.В., Щербатюк А.Ф., Ремезков А.А. Развитие технологического потенциала автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4 (34). С. 4–14. DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.001.
2. Матвиенко Ю. В., Ремезков А. В. Концепция создания роботизированного комплекса обследования и мониторинга технического состояния объектов подводной добычи // Газовая промышленность. 2020. №. S2. С. 172–179.
3. Bellingham J.G. Autonomous underwater vehicle docking // Springer Handbook of Ocean Engineering. Springer, Cham, 2016. P. 387–406.
4. Evans J.C., Keller K.M., Smith J.S., Marty P., Rigaud O.V. Docking techniques and evaluation trials of the SWIMMER AUV: an autonomous deployment AUV for work-class ROVs // MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.01CH37295). Honolulu, HI, USA, 2001. Vol.1. P. 520–528. doi: 10.1109/OCEANS.2001.968776.
5. Beckman J. A subsea space race: The race is on to introduce advanced robotics and autonomy into subsea oil and gas production operations. URL: <https://www.offshore-mag.com/subsea/article/14185568/subsea-docking-station-opens-path-for-resident-underwater-drones> (дата обращения: 06.12.2023).

6. Jan Christian Torvestad - M.Sc., Equinor. UIDtm Docking Station. URL: <https://d26pw6xcesd4up.cloudfront.net/1549374480/04-jan-christian-torvestad-uid-subsea-docking-station.pdf> (дата обращения: 06.12.2023).
7. Equinor launches 'world's first resident subsea drone program. URL: <https://www.offshore-mag.com/regional-reports/north-sea-europe/article/14285317/equinor-launches-worlds-first-resident-subsea-drone-program> (дата обращения: 06.12.2023).
8. HAUV Auto Docking. URL: <https://www.modus-ltd.com/news-article?id=15> (дата обращения: 06.12.2023).
9. Adis Ajdin. September 20, 2022 Modus and Equinor team up to deploy resident subsea drone at Johan Sverdrup. URL: <https://splash247.com/modus-and-equinor-team-up-to-deploy-resident-subsea-drone-at-johan-sverdrup/> (дата обращения: 06.12.2023).
10. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Структура системы электроснабжения автономного необитаемого подводного аппарата // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 47–55.
11. Wang X. et al. Reviews of power systems and environmental energy conversion for unmanned underwater vehicles // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, No. 4. P. 1958–1970.
12. Brighenti A. et al. EURODOCKER-a universal docking-downloading recharging system for AUVs: conceptual design results // IEEE Oceanic Engineering Society. OCEANS'98. Conference Proceedings (Cat. No. 98CH36259). IEEE. 1998. Vol. 3. P. 1463–1467.
13. Wirtz M., Hildebrandt M., Gaudig C. Design and test of a robust docking system for hovering AUVs // Proc. IEEE/MTS OCEANS. 2012. P. 1–6.
14. Brignone L., Perrier M., Viala C. A fully autonomous docking strategy for intervention AUVs // OCEANS 2007-Europe. IEEE. 2007. P. 1–6.
15. Jantapremjit P., Wilson P. A. Control and guidance for homing and docking tasks using an autonomous underwater vehicle // 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE. 2007. P. 3672–3677.
16. Feezor M.D. et al. Autonomous underwater vehicle homing/docking via electromagnetic guidance // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2001. Vol. 26, No. 4. P. 515–521.
17. Hong Y.H. et al. Development of the homing and docking algorithm for AUV // ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE. 2003. P. ISOPE-I-03-112.
18. Evans J. et al. Autonomous docking for Intervention-AUVs using sonar and video-based real-time 3D pose estimation // Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No. 03CH37492). IEEE. 2003. Vol. 4. P. 2201–2210.
19. McEwen R.S. et al. Docking control system for a 54-cm-diameter (21-in) AUV // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2008. Vol. 33, No. 4. P. 550–562.

Об авторах

КОСТЕНКО Владимир Владимирович, к.т.н., заведующий лабораторией исполнительных устройств и систем телеуправления, ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: подводная робототехника, системы управления движением автономных и телеуправляемых подводных роботов, движительно-рулевые комплексы, динамические модели, подводные привязные системы.

Тел.: +7 (423) 243-24-16

E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru

SPIN-код: 2310-3141. **ORCID:** 0000-0002-3821-3787

Resercher ID: AAF-6399-2021. **Scopus ID:** 57189036440

БЫКАНОВА Анна Юрьевна, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории исполнительных устройств и систем телеуправления

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: подводная робототехника, необитаемые подводные аппараты, манипуляционные устройства, системы стыковки

Тел.: +7 (423) 243-24-16. **E-mail:** Vladianna@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3040-1345. **Scopus ID:** 7202004207

МИХАЙЛОВ Денис Николаевич, старший научный сотрудник лаборатории исполнительных устройств и систем телеуправления

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: подводная робототехника, аппаратно-программные платформы, движительно-рулевые комплексы и системы энергообеспечения автономных и телеуправляемых подводных роботов

Тел.: +7 (423) 243-24-16. **E-mail:** denmih@marine.febras.ru

SPIN-код: 1940-6170. **ORCID:** 0000-0002-2427-8459

Resercher ID: P-4784-2017. **Scopus ID:** 57215280371

РЕМЕЗКОВ Андрей Владимирович, советник проректора по научной работе

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Дальневосточный федеральный университет

Адрес: 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

Научные интересы: подводная робототехника, необитаемые подводные аппараты, автономные и телеуправляемые подводные роботы.

Тел.: +7 (914) 705-73-90

E-mail: remezkov.av@dvfu.ru

ORCID: 0000-0002-2491-008X

Для цитирования:

Костенко В.В., Быканова А.Ю., Михайлов Д.Н., Ремезков А.В. СТАНЦИЯ ПОДВОДНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ГИБРИДНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПОДВОДНОГО ДОБЫЧНОГО КОМПЛЕКСА // Подводные исследования и робототехника. 2024. № 1 (47). С. 4–18. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_47_01_01. EDN: CYRHVW.