

УДК 629.127.4

doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-18-25

Анализ режимов функционирования гибридного подводного робототехнического комплекса

В.В. Вельтищев, Е.И. Аладышева

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Analysis of the Operating Modes of the Hybrid Underwater Robotic System

V.V. Veltishev, E.I. Aladysheva

Bauman Moscow State Technical University

Океанологические исследования и подводно-технические работы невозможно провести без автономных необитаемых и телеуправляемых подводных аппаратов. Однако наличие недостатков у каждого типа аппаратов ограничивает их применение, позволяя решать только задачи узкого профиля. Для решения этой проблемы предложено использовать гибридный подводный робототехнический комплекс, состоящий из автономного и телеуправляемого аппаратов, соединенных кабелем. Определены функциональные возможности предложенного гибридного комплекса. Приведены результаты анализа работы гибридного комплекса в режимах совместного движения и буксировки с помощью математического моделирования. Вследствие ограничений, накладываемых на телеуправляемый подводный аппарат и кабель между аппаратами, скорость движения гибридного подводного робототехнического комплекса составляет около 1 м/с в режиме совместного движения и около 2 м/с в режиме буксировки. Буксировку телеуправляемого подводного аппарата рекомендовано проводить на короткой длине кабеля при погруженном положении автономного необитаемого подводного аппарата. Кроме того, необходимо регулировать длину кабеля между аппаратами.

Ключевые слова: гибридный подводный аппарат, автономный необитаемый подводный аппарат, телеуправляемый подводный аппарат, режим буксировки, совместное движение, рабочая зона

In the modern world, performing oceanological research and underwater technological operations is impossible without using autonomous and remotely operated underwater vehicles. However, each of these types of vehicles has disadvantages limiting their application and allowing only narrow-profile tasks to be performed. To solve this problem, it is proposed to use a hybrid underwater robotic complex consisting of an autonomous and remote-controlled vehicles connected with a cable. The functionality of the proposed hybrid complex is determined. The results of the analysis of the mathematical models of hybrid complex operation in the modes of joint movement and towing are presented. Due to the restrictions imposed on the remotely controlled underwater vehicle and the cable between the vehicles, the speed of the hybrid underwater robotic complex is about 1 m/s in the joint motion mode and about 2 m/s in the towing mode. It is recommended to tow a remote-controlled underwater vehicle on a short cable length when the autonomous uninhabited underwater vehicle is submerged. In addition, it is necessary to adjust the cable length between the devices.

Keywords: hybrid underwater vehicle, autonomous uninhabited underwater vehicle, remotely operated underwater vehicle, towing mode, joint movement, working area

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) и телеуправляемые подводные аппараты (ТПА) широко применяют для различных океанологических исследований [1, 2]. При этом оба типа аппарата имеют недостатки, ограничивающие их использование, позволяя решать только задачи узкого профиля [3–6].

Решением этой проблемы может стать многофункциональный гибридный подводный робототехнический комплекс (далее ПРК), совмещающий в себе достоинства ТПА и АНПА [7–9]. В этом комплексе АНПА заменяет для ТПА судно-носитель. Также АНПА предложено оснастить выпускаемым бумом со встроенным приемопередатчиком, который позволит ПРК функционировать в режиме телеуправления, что повысит эффективность выполнения миссии [10].

Предполагается, что ПРК имеет следующие функциональные возможности [7]:

- гидроакустический поиск, когда ТПА пристыкован к АНПА;
- осмотровые или инженерные работы, когда АНПА стабилизирован в точке, а ТПА выполняет какую-либо задачу под управлением оператора (режим «на стопе»);
- решение обзорно-поисковых задач в режиме буксировки ТПА автономным аппаратом;
- решение обзорно-поисковых задач при совместном движении аппаратов.

Последние два режима представляют наибольший интерес.

Цель работы — предварительный анализ параметров движения ПРК и оценка возможности реализации указанных режимов в рамках одного комплекса.

Инструменты для проведения исследования и исходные данные. Для анализа различных конфигураций ПРК проведено математическое моделирование его работы с помощью программы, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эта программа способна выполнять следующие операции:

- построение статических конфигураций кабеля;
- определение реакций кабеля на его ходовом и коренном участках.

В программе реализована дискретная (конечномерная) модель кабеля, которая предполагает его аппроксимацию последовательностью шарнирно соединенных стержней с известными массогабаритными и гидродинамическими па-

раметрами [11]. В качестве обобщенных координат использованы углы наклона i -го стержня φ_i .

При построении плоской модели системы из двух тел, связанных кабелем, приняты следующие предпосылки и допущения:

- аппроксимация абсолютно жесткими стержнями одинакового диаметра с равными коэффициентами гидродинамического сопротивления;
- звенья кабеля соединены сферическими шарнирами, первый из которых расположен на АНПА, последний — на ТПА;
- точка крепления кабеля к ТПА совпадает с его центром масс; туда же приложены все силы, действующие на аппарат;
- угловая ориентация ТПА принята жестко фиксированной относительно вектора скорости набегающего потока воды $v_{н.п}$;
- гидродинамические силы, силы Архимеда и тяжести, действующие на звено кабеля, приложены к его середине;
- при рассмотрении условия равновесия звеньев кабеля считается, что ориентация i -го звена целиком определяется силами, приложенными к $(i - 1)$ -му шарниру без учета сил, воздействующих на звено; гидродинамические силы, силы тяжести и Архимеда i -го звена учитываются при определении ориентации следующего $(i + 1)$ -го звена.

Схема статической конфигурации кабеля приведена на рис. 1, где $X_{ТПА}$ и $Y_{ТПА}$ — горизонтальная и вертикальная координаты ТПА; $W_{АНПА}$ — сила остаточной плавучести ТПА; P_x и P_y — горизонтальная и вертикальная проекции силы, создаваемой движительным комплексом ТПА; R_x — сила лобового сопротивления ТПА.

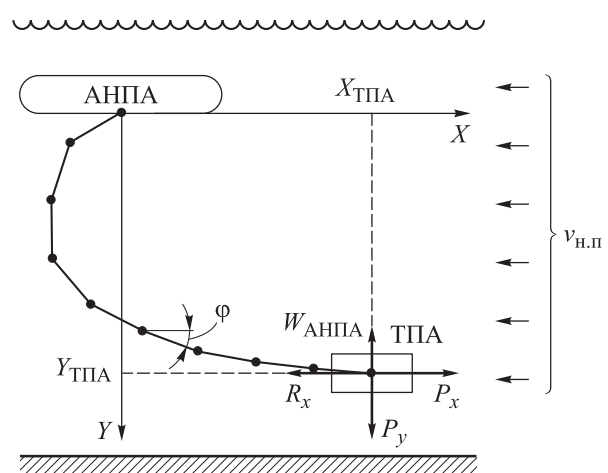


Рис. 1. Расчетная схема статической конфигурации кабеля

Исходными данными для расчета являются следующие параметры:

- скорость движения системы кабель — аппарат относительно воды, в качестве которой может выступать скорость подводного течения или скорость совместного движения двух аппаратов;
- силы, создаваемые движительным комплексом ТПА;
- сила лобового сопротивления ТПА;
- сила остаточной плавучести ТПА;
- длина, диаметр, погонная плавучесть кабеля.

Очевидно, что ТПА, размещаемый на борту АНПА, должен иметь габаритные и энергетические ограничения. В качестве ТПА, отвечающего таким требованиям, выбран подводный аппарат МАКС-300.

Техническая характеристика подводного аппарата МАКС-300

Упор движителя, Н:	
маршевого	724
вертикального	784
лагового	300
Сопротивление, отнесенное к квадрату скорости, кг/м	187
Плавучесть, Н	10
Габаритные размеры, мм	860×520×460
Масса, кг	45

В качестве моделей выбраны кабели большего (далее толстый кабель) и меньшего диаметра (далее тонкий кабель) [14, 15], используемые на ТПА.

Техническая характеристика кабелей

	тонкого	толстого
Диаметр, мм	11,0	19,5
Погонная масса, кг/м	0,097	0,306
Усилие на разрыв, Н	981	2942

При проведении расчетов приняты следующие исходные положения:

- движение ПРК происходит в вертикальной плоскости;
- максимальная длина кабеля, который можно разместить на борту АНПА, составляет 400 м;
- энергетика ТПА ограничена в соответствии с указанными в технической характеристике данными;
- энергетика АНПА не ограничена.

Решение обзорно-поисковых задач при совместном движении аппаратов. Одним из спо-

собов решения таких задач является режим совместного движения аппаратов, при котором АНПА передвигается по заданной траектории, а ТПА занимает определенное положение в системе координат АНПА и перемещается синхронно с ним за счет работы собственных движителей.

Схемы перемещения ПРК при совместном движении аппаратов приведены на рис. 2, где $v_{АНПА}$ и $v_{ТПА}$ — скорости движения АНПА и ТПА. Первая схема (рис. 2, а) предполагает движение АНПА по поверхности для осуществления связи с оператором по радиочастотному каналу. Во второй схеме использован буй с приемопередатчиком для связи с оператором при движении АНПА в погруженном состоянии (рис. 2, б).

В ходе исследования проанализированы положения ТПА относительно АНПА, ограниченные длиной используемого кабеля и воздей-

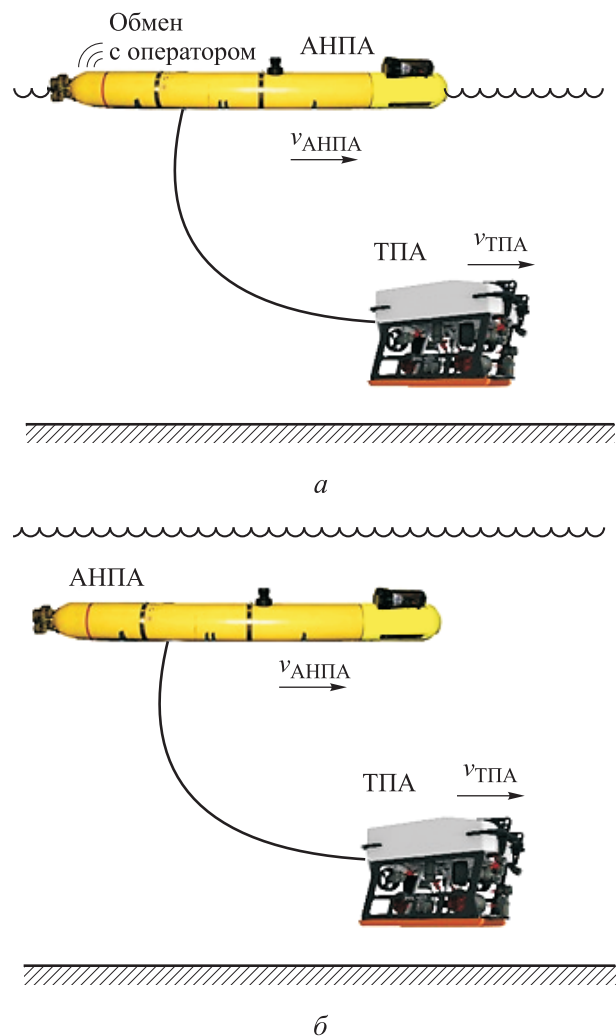


Рис. 2. Схемы перемещения ПРК при совместном движении аппаратов в режиме телеуправления (а) и в автономном режиме (б)

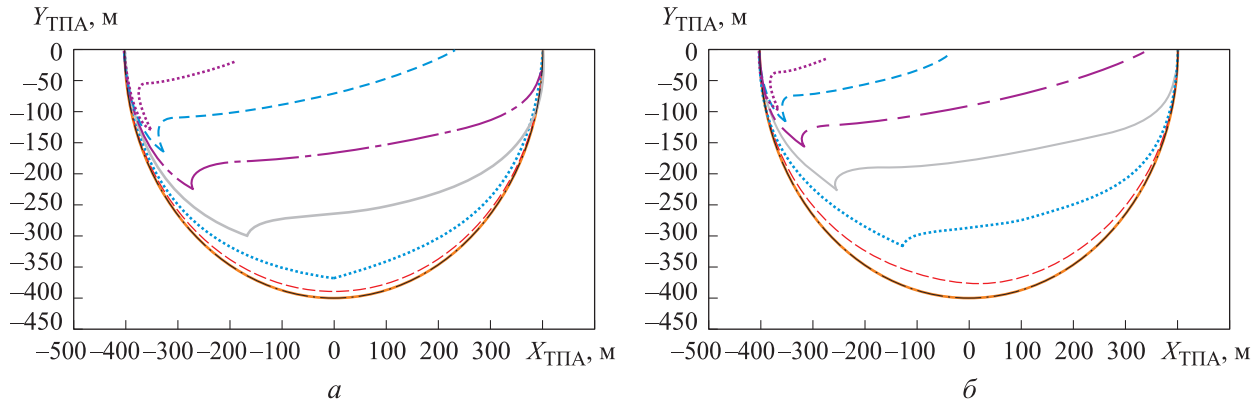


Рис. 3. Рабочие зоны ТПА при использовании тонкого (а) и толстого (б) кабелей длиной 400 м для различных значений скорости движения ПРК:
 — $v_{\text{ПРК}} = 0$; — — — $v_{\text{ПРК}} = 0,25$ м/с; - - - $v_{\text{ПРК}} = 0,50$ м/с; $v_{\text{ПРК}} = 0,75$ м/с;
 — — — $v_{\text{ПРК}} = 1,00$ м/с; — — — $v_{\text{ПРК}} = 1,25$ м/с; - - - $v_{\text{ПРК}} = 1,50$ м/с; $v_{\text{ПРК}} = 1,75$ м/с

ствующими на него предельно допустимыми силовыми нагрузками, а также энергетикой аппарата. По результатам моделирования с использованием двух различных кабелей построена рабочая зона ТПА вокруг АНПА, ограниченная крайними точками возможных положений ТПА. Результаты моделирования — рабочие зоны ТПА при движении ПРК с разной скоростью v — приведены на рис. 3.

Случай движения ПРК с нулевой скоростью соответствует его работе «на стопе». Согласно результатам моделирования, при указанных исходных параметрах движение ПРК со скоростью, превышающей 1,00...1,25 м/с (в зависимости от используемого кабеля), приводит к вырождению рабочей зоны ТПА вокруг АНПА, что делает движение с большей скоростью нецелесообразным.

Аналогичным образом построены рабочие зоны для тонкого и толстого кабелей длиной

100...400 м. По этим зонам определена максимальная глубина ТПА относительно АНПА. Зависимости максимальной глубины ТПА от скорости движения ПРК при использовании тонкого и толстого кабелей разной длины L приведены на рис. 4.

При повышении скорости движения ПРК максимальная глубина погружения ТПА относительно АНПА существенно уменьшается. Очевидно, что наибольшее влияние набегающего потока испытывает кабель большей длины. Поэтому при скорости движения ПРК более 1 м/с рекомендуется управлять длиной кабеля АНПА-ТПА.

В качестве примера рассмотрены рабочие зоны ПРК, движущегося со скоростью $v_{\text{ПРК}} = 1,25$ м/с (рис. 5). При этом наибольший интерес представляет правая часть рабочих зон, соответствующая положению ТПА перед АНПА, как показано на рис. 2.

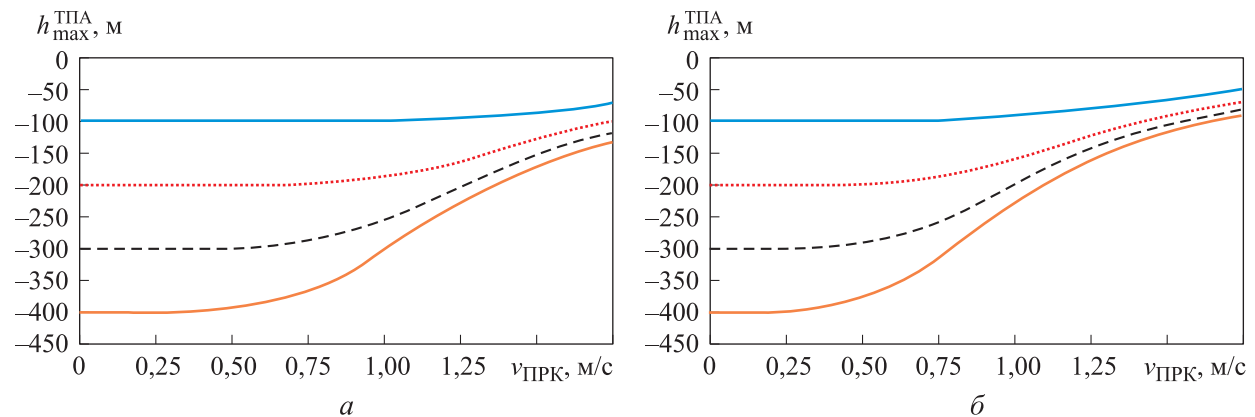


Рис. 4. Зависимости максимальной глубины ТПА $h_{\text{max}}^{\text{ТПА}}$ от скорости движения ПРК $v_{\text{ПРК}}$ при использовании тонкого (а) и толстого (б) кабелей разной длины:
 — $L = 100$ м; $L = 200$ м; - - - $L = 300$ м; — $L = 400$ м

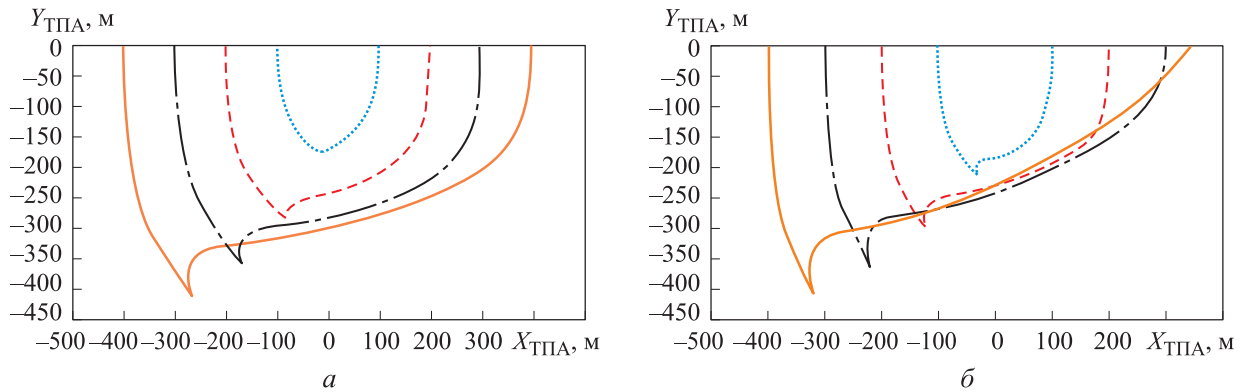


Рис. 5. Рабочие зоны ТПА в режиме совместного движения аппаратов со скоростью $v_{\text{ПРК}} = 1,25$ м/с при использовании тонкого (а) и толстого (б) кабелей разной длины: — $L = 100$ м; - - - — $L = 200$ м; — · — — — $L = 300$ м; — — — — $L = 400$ м

Сравнение рабочих зон ТПА при использовании кабелей разной длины, позволяет сделать следующие выводы:

- изменение длины кабеля существенно влияет на левую часть рабочей зоны, соответствующей движению ТПА сзади АНПА;
- при движении ТПА с опережением АНПА сокращение длины кабеля не оказывает значительного влияния на возможные положения ТПА.

Решение обзорно-поисковых задач при буксировке ТПА. Другим способом решения обзорно-поисковых задач является движение ПРК в режиме буксировки. В отличие от режима совместного движения аппаратов, при буксировке маршевое движение ТПА осуществляется путем его буксировки автономным аппаратом.

В этом режиме управляющие силы приложены к одному из аппаратов — автономному, тогда как другой — буксируемый, должен двигаться по заданной траектории [5]. При этом маршевые движители ТПА не используются. Удержание максимальной глубины ТПА осуществляется за счет работы вертикальных движителей.

Схемы движения ПРК при буксировке ТПА приведены на рис. 6.

Для движения ПРК в режиме буксировки построены рабочие зоны ТПА относительно АНПА. По результатам моделирования получены зависимости максимальной глубины погружения ТПА от скорости буксировки (рис. 7). Практический интерес представляет область результатов (выделенная зеленым цветом) для скорости буксировки, превышающей 0,5 м/с.

Ограничение скорости буксировки для каждого случая обусловлено обрывом кабеля, обозначенного на рис. 7 кружком.

На основании результатов моделирования, приведенных на рис. 7, можно заключить следующее:

- применение толстого кабеля позволяет буксировать ТПА с большей скоростью;
- использование более длинного кабеля при больших скоростях движения ПРК (более 2 м/с) для выбранных исходных параметров не дает

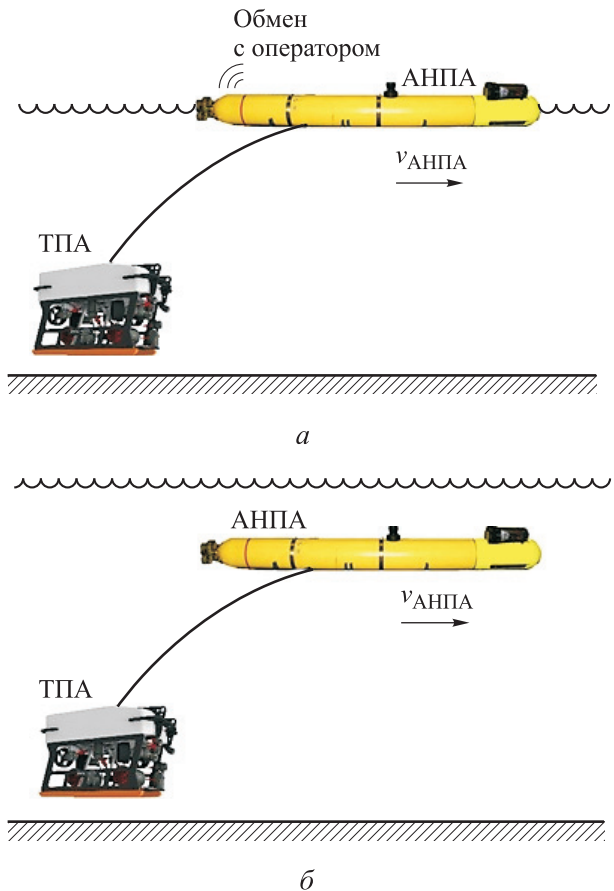


Рис. 6. Схемы движения ПРК при буксировке ТПА в режиме телеуправления (а) и в автономном режиме (б)

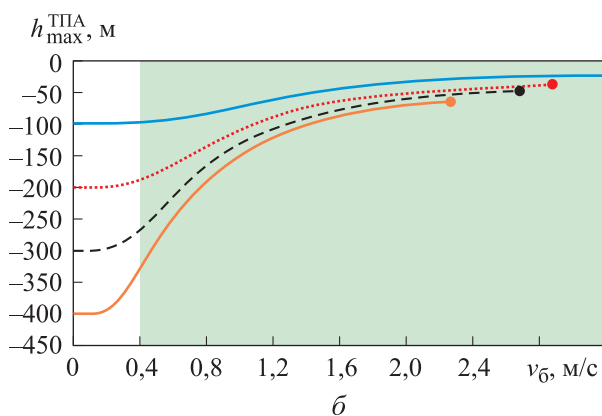
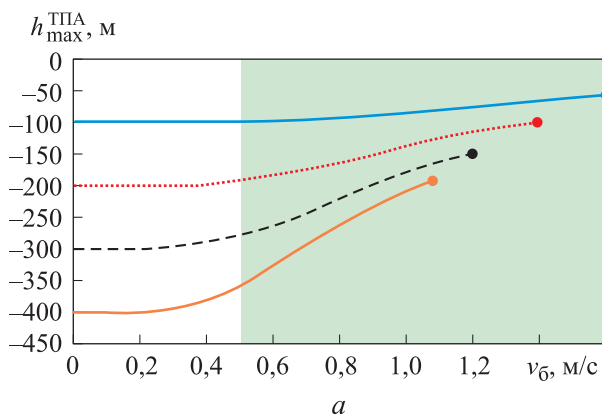


Рис. 7. Зависимости максимальной глубины погружения ТПА $h_{\max}^{\text{ТПА}}$ от скорости буксировки v_b при использовании тонкого (а) и толстого (б) кабелей разной длины:

— $L = 100$ м; — $L = 200$ м; — $L = 300$ м;
— $L = 400$ м

существенного выигрыша по глубине погружения ТПА;

- применение кабеля большей длины позволяет увеличить глубину погружения ТПА при малых скоростях движения, однако это снижение скорости буксировки приводит к существенным затратам времени;

- уменьшение длины кабеля увеличивает максимальную скорость буксировки;

- так как использование короткого кабеля позволяет достичь глубины погружения ТПА всего 50...100 м, буксировку ТПА целесообразно осуществлять при подводном положении АНПА, как показано на рис. 6, б.

Выводы

1. При указанных исходных параметрах скорость ПРК в режиме совместного движения аппаратов целесообразно ограничить 1,00...1,25 м/с в зависимости от используемого кабеля.

2. Так как при работе ПРК в режиме совместного движения аппаратов наибольшее влияние набегающего потока испытывает кабель большей длины, при скорости движения, близкой к максимальной (около 1 м/с), рекомендуется управлять длиной кабеля АНПА-ТПА. При движении ТПА с опережением АНПА сокращение длины кабеля несущественно влияет на возможные положения ТПА.

3. Использование более толстого кабеля позволяет увеличить скорость движения ПРК в режиме буксировки. Однако при больших скоростях движения (выше 2 м/с) не дает существенного выигрыша по глубине погружения ТПА.

4. Поскольку при уменьшении длины кабеля увеличивается максимальная скорость буксировки ТПА, ее целесообразно осуществлять на коротком кабеле (100...200 м).

5. При применении короткого кабеля максимальная глубина погружения ТПА составляет 50...100 м. Поэтому для достижения большей глубины буксировку ТПА целесообразно осуществлять в подводном положении АНПА.

Литература

- [1] Бочаров Л.Ю. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития. Ч. 2. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2009, № 8, с. 88–93.
- [2] Бобков А.В. Основные направления развития подводной робототехники. *Мат. XXI науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов*. Саранск, изд-во МГУ им. Н.П. Огарева, 2017, с. 263–267.
- [3] Бочаров Л.Ю. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития. Ч. 1. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2009, № 7, с. 62–69.
- [4] Гоцык М.О., Жиленков А.А. Перспективы использования автономных обитаемых подводных аппаратов. *Actualscience*, 2016, т. 2, № 4, с. 46–48.
- [5] Лискин В.А., Зарецкий А.В., Римский-Корсаков Н.А. Разработка глубоководных буксируемых систем для исследования придонной области океана. *Научное обозрение. Технические науки*, 2019, № 1, с. 37–42.

- [6] Грибанова И.В. Состояние и тенденции развития подводных робототехнических средств. *Матрица научного познания*, 2019, № 5, с. 19–22.
- [7] Вельтищев В.В., Аладышева Е.И. Перспективы использования гибридных необитаемых подводных аппаратов для океанологических исследований. *Тр. XVI всерос. науч.-тех. конф. Современные методы и средства океанологических исследований*. Москва, Академия Жуковского, 2019, с. 124–127.
- [8] Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Костенко В.В. и др. Модели, системы и технологии подводных роботов и их применение для решения поисково-обследовательских задач. *Тр. XIII ВСПУ-2019*. Москва, ИПУ РАН, 2019, с. 3271–3278.
- [9] Матвиенко Ю.В., Новиков А.И., Ремизов А.В. Концепция создания роботизированного комплекса обследования и мониторинга технического состояния объектов подводной добычи. *Технические проблемы освоения Мирового океана*, 2019, № 8, с. 6–10.
- [10] Костенко В.В., Мокеева И.Г. Исследование характеристик установившихся режимов и динамики привязной системы автономного подводного робота с буксируемым поверхностным модулем радиосвязи. *Подводные исследования и робототехника*, 2020, № 2, с. 34–41.
- [11] Вельтищев В.В. *Проектирование движительных комплексов подводных аппаратов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 167 с.
- [12] Костенко В.В., Михайлов Д.Н. Разработка телеуправляемого подводного аппарата «МАКС-300». *Подводные исследования и робототехника*, 2012, № 1, с. 36–46.
- [13] Бауло Е.Н., Букин И.О., Дорошенко И.М. и др. Телеуправляемые подводный комплекс для исследования биооптических параметров морской воды. *Оптика атмосферы и океана*, 2014, № 3, с. 262–265.
- [14] Базовые технические характеристики H300/H800. *oceanos.ru: веб-сайт*. URL: https://oceanos.ru/H300_H800_details (дата обращения: 21.12.2021).
- [15] ROV «Super Gnom Pro». *geaco.eu: веб-сайт*. URL: <http://geaco.eu/products/gnom/super-gnom-pro.htm> (дата обращения: 30.01.2020).

References

- [1] Bocharov L.Yu. Unmanned underwater vehicles. Their status and general development trends. Part 2. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2009, no. 8, pp. 88–93. (In Russ.).
- [2] Bobkov A.V. [Main directions of underwater robotics development]. *Mat. XXI nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Proc. XXI Int. Sci.-Tech. Conf. of Young Scientists, Postgraduates and Students]. Saransk, Izd-vo MGU im. N.P. Ogareva Publ., 2017, pp. 263–267. (In Russ.).
- [3] Bocharov L.Yu. Unmanned underwater vehicles. Their status and general development trends. Part 1. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2009, no. 7, pp. 62–69. (In Russ.).
- [4] Gotsyk M.O., Zhilenkov A.A. An overview of autonomous unmanned underwater vehicles. *Actualscience*, 2016, vol. 2, no. 4, pp. 46–48. (In Russ.).
- [5] Liskin V.A., Zaretskiy A.V., Rimskiy-Korsakov N.A. Deep towed systems development for near bottom ocean space study. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki* [Scientific Review. Technical science], 2019, no. 1, pp. 37–42. (In Russ.).
- [6] Griбанова I.V. Current state and development trends for underwater robotics. *Matritsa nauchnogo poznaniya*, 2019, no. 5, pp. 19–22. (In Russ.).
- [7] Vel'tishchev V.V., Aladysheva E.I. [Prospect of using hybrid unmanned underwater vehicles for oceanic studies]. *Тр. XVI всерос. науч.-тех. конф. Современные методы и средства океанологических исследований* [Proc. XVI Russ. Sci.-Tech. Conf. Modern Methods and Tools of Oceanic Studies]. Moscow, Akademiya Zhukovskogo, 2019, pp. 124–127. (In Russ.).
- [8] Kiselev L.V., Inzartsev A.V., Kostenko V.V. et al. [Models, systems and technologies of underwater robots and their application for solving exploration problems]. *Тр. XIII ВСПУ-2019* [Proc. XIII VSPU-2019]. Moscow, IPU RAN Publ., 2019, pp. 3271–3278. (In Russ.).

- [9] Matvienko Yu.V., Novikov A.I., Remizov A.V. Conception for development of robotic complex for study and condition monitoring of underwater mining products. *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana*, 2019, no. 8, pp. 6–10. (In Russ.).
- [10] Kostenko V.V., Mokeeva I.G. The research of steady-state modes characteristics, and dynamics of tethered system of the autonomous underwater robot with towed surface radio-communication module. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2020, no. 2, pp. 34–41. (In Russ.).
- [11] Vel'tishchev V.V. *Proektirovanie dvizhitel'nykh kompleksov podvodnykh apparatov* [Design of propulsion system for underwater vehicles]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2019. 167 p. (In Russ.).
- [12] Kostenko V.V., Mikhaylov D.N. Development of the remotely operated underwater vehicle "MAKS-300". *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigations and Robotics], 2012, no. 1, pp. 36–46. (In Russ.).
- [13] Baulo E.N., Bukin I.O., Doroshenkov I.M. et al. Remotely controllable complex for study of biooptical parameters of the see water. *Optika atmosfery i okeana*, 2014, no. 3, pp. 262–265. (In Russ.).
- [14] Bazovye tekhnicheskie kharakteristiki H300/H800 [Basic technical characteristics of H300/H800]. *oceanos.ru: website*. URL: https://oceanos.ru/H300_H800_details (accessed: 21.12.2021). (In Russ.).
- [15] ROV «Super Gnom Pro». *geaco.eu: website*. URL: <http://geaco.eu/products/gnom/super-gnom-pro.htm> (accessed: 30.01.2020).

Статья поступила в редакцию 20.01.2022

Информация об авторах

ВЕЛЬТИЩЕВ Вадим Викторович — доктор технических наук, зав. кафедрой «Подводные роботы и аппараты». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: vvv@bmstu.ru).

АЛАДЫШЕВА Елена Игоревна — аспирант кафедры «Подводные роботы и аппараты». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: aladysheva@bmstu.ru).

Information about the authors

VELTISCHEV Vadim Victorovich — Doctor of Science (Eng.), Head of the Department of Underwater Robots and Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vvv@bmstu.ru).

ALADYSHEVA Elena Igorevna — Postgraduate, Department of Underwater Robots and Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aladysheva@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Вельтищев В.В., Аладышева Е.И. Анализ режимов функционирования гибридного подводного робототехнического комплекса. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 6, с. 18–25, doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-18-25

Please cite this article in English as:

Veltichev V.V., Aladysheva E.I. Analysis of the Operating Modes of the Hybrid Underwater Robotic System. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 6, pp. 18–25, doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-18-25