

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ КОРПУСОВ СУДОВ ОТ ОБРАСТАНИЙ

И.Л. Ермолов

Традиционно для проведения исследований или технологических операций под водой рассматриваются роботы, свободно перемещающиеся в водной среде (АНПА, ТНПА). В статье рассматривается новый для данной области применения тип роботов – роботы вертикального перемещения. Данный тип роботов традиционно рассматривался в наземном исполнении, однако последние разработки подтвердили эффективность применения таких роботов и для проведения подводных исследований. В статье описываются работы, проводимые в лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН по роботизации выполнения технологических операций в водной среде с помощью роботов вертикального перемещения. В частности, рассматриваются вопросы создания робототехнической системы для очистки корпусов судов от обрастаний. Работы выполнены совместно с Санкт-Петербургским государственным морским техническим университетом.

Ключевые слова: подводные исследования, роботы вертикального перемещения, подводная дефектоскопия, очистка корпусов судов от обрастаний.

■ Актуальность роботизации очистки корпусов судов

Флот играет важную роль экономике России. На сегодняшний день гражданский флот насчитывает около 2200 торговых и рыболовных судов, а также более 1200 пассажирских судов.

Помимо этого более 300 кораблей, катеров и подводных лодок обеспечивают оборону и безопасность страны.

Однако корпуса судов, находящихся на плаву, постоянно подвергаются обрастанию. Первично на бор-

ту формируется бактериальная слизь, затем на корпус прикрепляются водоросли, а завершается процесс обрастания появлением рачков-балабусов.

Обрастание корпуса происходит неодинаково как по вертикали (ватерлиния, участки выше и ниже изгиба корпуса к килю, днище), так и по продольной оси судна (нос, мидель, корма).

При этом на скорость обрастания влияет скорость хода судна, продолжительность стоянок, температура морской воды, специфические особенности моря пребывания.



Рис. 1. Постановка кораблей и судов в сухой док для судоремонта



Рис. 2. Очистка корпусов судов водолазами

Обрастание корпуса оказывает определённо негативное влияние на эксплуатацию судна или корабля. Оно повышает гидродинамическое сопротивление корпуса, что снижает скорость хода судна и увеличивает расход топлива. Помимо этого обрастание снижает боеготовность кораблей и судов ВМФ, а также усиливает демаскирующие признаки подводных лодок.

Традиционно с обрастанием борются путём очистки корпуса судна при его постановке в сухой док (рис. 1). Однако в последнее время использование сухих доков стало очень затратным. В нашей стране на это ещё наложилось непродуманное проведение приватизации в 1990-х гг., в результате которой значительная часть сухих доков оказалась приватизированной и исчезла из доступа. В итоге резкий рост торгового флота России в последние несколько лет столкнулся с нехваткой национальных сервисных мощностей сухих доков.

Альтернативной технологией очистки корпусов судов некоторое время назад стала очистка с помощью водолазов (рис. 2). Водолазы использовали специальные очистные фрезы, которые срезали обрастание с корпуса. Однако недостатком данной технологии является сложность регулирования силы резания, что может привести к снятию части защитного лакокрасочного слоя с корпуса и появлению преждевременной коррозии.

На рубеже XX и XXI вв. начали разрабатываться робототехнические комплексы для очистки корпусов судов [1, 2]. Сейчас их в мире известно несколько десятков моделей и наименований. Однако значительная часть таких РТК предназначена опять-таки для применения на корпусе судна, находящегося в сухом доке, что не даёт требуемой экономической эффективности выполнения операции очистки.

Имелись некоторые разработки по созданию РТК очистки для водной среды. Например, работы в рам-

ках НИР HISMAR [4] (рис. 3). Однако данные прототипы не были реализованы серийно.

В статье представлена информация по разработке РТК очистки принципиально нового типа – для проведения очистки корпуса судна, находящегося на плаву (как вариант – на рейде или под нагрузкой).



Рис. 3. Прототип робота для очистки корпусов судов HISMAR

■ Концепция работы РТК для очистки корпусов судов

Новый РТК для очистки корпусов судов должен функционировать следующим образом [3].

Сам робот полностью базируется на сервисном судне.

При необходимости выполнения операции очистки сервисное судно с роботом на борту швартуется к очищаемому судну (рис. 4).

Швартовка осуществляется с применением двух кранцов, обеспечивающих зазор между корпусами очищаемого судна и сервисного судна.

Место швартовки определяется с учётом выполненной ранее операции очистки корпуса очищаемого

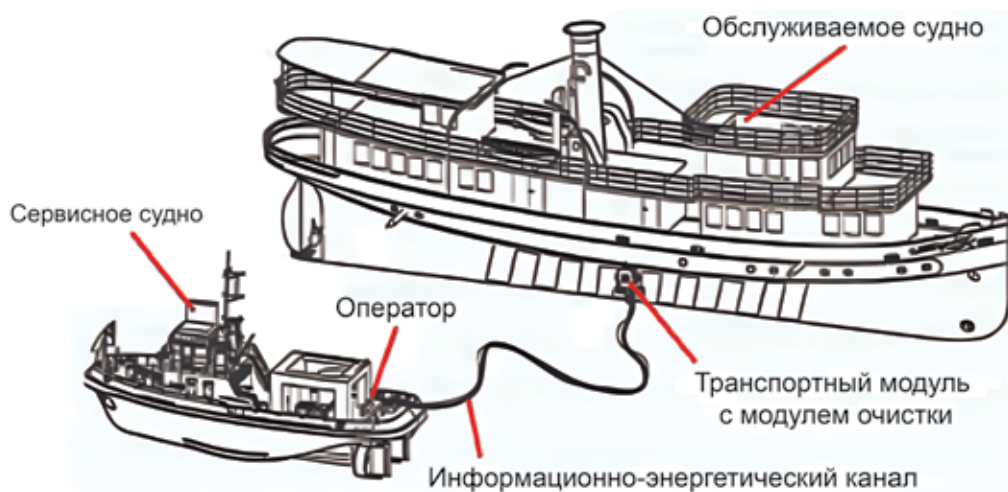


Рис. 4. Схема взаимодействия очищаемого и сервисного судов

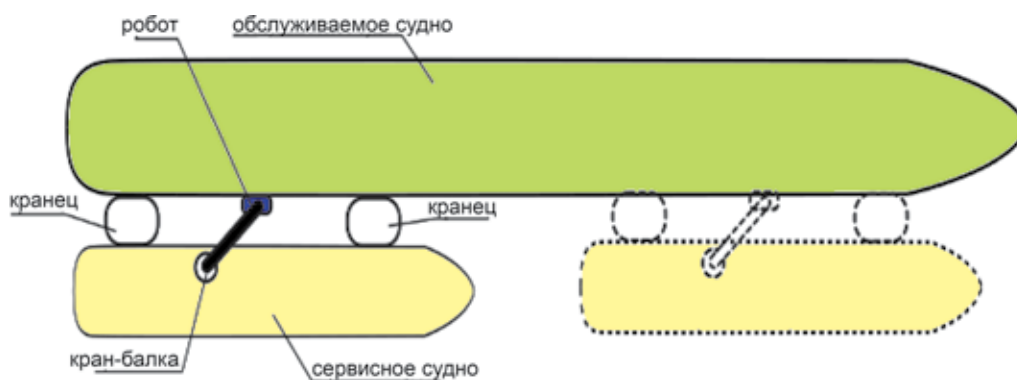


Рис. 5. Схема установки очистного робота



Рис. 6. Типовая схема деления (типовой состав) РТК

судна, а также прогнозных данных по степени об-
растания его корпуса на текущий момент времени.

Затем сам робот с помощью палубного крана пе-
ремещается к корпусу очищаемого судна и фиксиру-
ется на нём между кранцов (рис. 5).

Далее робот выполняет очистку пространства
между кранцами по зигзагообразной траектории.

После этого происходит перешвартовка на следу-
ющую готовую для очистки часть корпуса и возоб-
новляется процесс очистки.

По завершении очистки одной части корпуса сер-
висное судно перешвартовывается с другого борта,
и процесс очистки продолжается. Впрочем, очистку
можно осуществлять одновременно с двух бортов
двумя роботами.

■ Применение типовой схемы деления РТК

В рамках формирования технического облика
РТК для очистки корпусов судов впервые был ис-
пользован новый подход, основывающийся в при-
менении типовой схемы деления (типового состава)
РТК.

Данный подход изначально разрабатывался для
робототехнических комплексов военного и специаль-
ного назначения, вошёл в некоторые документы стан-
дартизации, однако он с успехом может применяться
и для РТК гражданского назначения.

Особенностью типовой схемы деления (типово-
го состава) РТК является её ориентация на основные
базовые функции, реализуемые РТК: транспортную,
энергетическую, информационную, коммуникацион-
ную, технологическую и интеллектуальную.

Соответственно все компоненты РТК группиру-
ются в модули, реализующие эти функции (рис. 6).
Существует исчерпывающее описание по составу
каждого модуля.

Подробнее о типовой схеме деления РТК можно
прочитать в [9].

Применение типовой схемы деления РТК даёт
разработчику ряд преимуществ, позволяющих эф-
фективно определять как состав компонентов РТК,
так и получаемые в такой комплектации характери-
стики РТК.

■ Структура робота

Транспортный модуль (базовый носитель - шас-
си) робота принято решение реализовывать на базе
шагающего привода с пневматическими присоска-
ми. Предварительно было рассмотрено несколько

альтернативных схем. Ряд роботов для очистки ис-
пользуют колёсные движители с магнитным устрой-
ством крепления, однако эта схема была отвергнута,
поскольку на корпусе может сохраниться остаточное
намагничивание, что неприемлемо для военно-мор-
ского флота, а часть корпусов в гражданском флоте
изготавливается из материалов с низкими ферромаг-
нитными свойствами.

Модуль состоит из двух платформенных кон-
струкций, имеющих одну поступательную и одну
вращательную степени подвижности относительно
друг друга и узлы сцепления с поверхностью,
которые закреплены на пневмоприводах выдвиже-
ния-втягивания, расположенных на внутренней и
внешней платформах модуля (рис. 7).

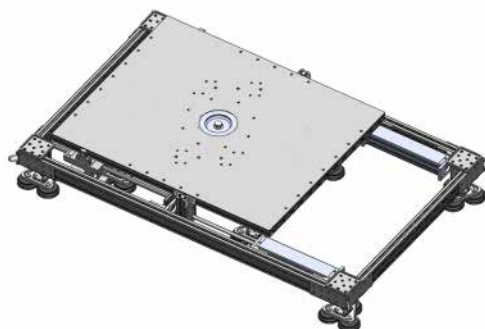


Рис. 7. Транспортная платформа как основная
часть транспортного модуля робота

На данный момент произведены расчёты основ-
ных режимов работы компонентов базового носите-
ля и выполнен предварительный выбор основных его
компонентов. Очевидно, что такое шасси не сможет
перемещаться по всем частям корпуса судна, однако,
по мнению разработчиков, до 80% корпуса проходи-
мо для такого технического решения.

Модуль технологический основывается на ис-
пользовании технологии гидродинамической резки.
Данная технология, реализованная в полузамкнутом
цикле, позволяет эффективно регулировать силу ре-
зания, а также обеспечивает экологичность процесса
резки. В НИР проведены расчёты, обосновывающие
режимы работы технологического модуля [8].

Модуль интеллектуальный проработан в части,
касающейся его структуры. Принято решение ис-
пользовать подход, заложенный в типовой схеме
деления РТК, в котором каждый модуль имеет свою
подсистему управления. В разработанной структу-
ре помимо основного устройства управления ещё
4 модуля (энергообеспечения, информационный,
аварийный и транспортный) имеют свои подсистемы
управления. Основное устройство управления реали-
зуется на базе Mini ITX NAS. В качестве операцион-

ной системы выбрана «Альт СП», которая является многофункциональной операционной системой, построенной на ядре Linux, с дистрибутивами, построенными на отечественной инфраструктуре Sisyphus, являющейся репозиторием, находящимся под юрисдикцией РФ.

При разработке модуля коммуникационного использована унификация с информационными протоколами, распространёнными в судостроении (RS-485 и МАНЧЕСТЕР).

Сенсорный модуль включает в себя датчики транспортного модуля, модуля энергообеспечения, а также датчики обнаружения препятствий. Перспективным является применение специализированного дефектоскопа для контроля целостности корпуса, однако в силу проблем его закупки принято решение для дефектоскопии использовать специализированную видеокамеру.

Модуль энергообеспечения базируется на борту сервисного судна и включает в себя основные компоненты для обеспечения электрической энергией, гидравлической струёй и сжатым воздухом. Произведён расчёт основных мощностей, необходимых для функционирования РТК.

Пульт управления и контроля реализован на базе защищенного ЭВМ-ноутбука GPD Win MAX 2. Данное решение является достаточным с точки зрения производительности, экономической обоснованности и эргономики задающих и воспроизводящих устройств.

Наряду с упомянутыми проработаны аварийная подсистема, а также средства обеспечения и обслуживания.

■ Дополнительные научные исследования

Проработка технического облика РТК для очистки выявила необходимость в проведении дополнительных научных исследований.

В частности, было необходимо оценить эффективность работы вакуумных захватных устройств в воздушной, водной и смешанной средах. Научные исследования по этой теме в настоящее время проводятся в рамках гранта РНФ №№ 23-11-00073 «Вакуумные захватные устройства для роботов, эксплуатируемых в воздушной, жидкой и пограничной средах». На данный момент разработан лабораторный стенд, позволяющий получать характеристики протекающих процессов в воздушной, водной и смешанной средах (рис. 8). На нём проведены исследования газодинамических и гидродинамических процессов в полостях и каналах



Рис. 8. Испытания на отрыв вакуумной присоски в водной среде

вакуумных захватных устройств, функционирующих в воздушной, водной и смешанной средах. Результаты показали, что газо- и гидродинамические процессы, протекающие в полостях присоски, в значительной степени влияют на время переходных процессов и скорость выхода на установившийся уровень разрежения в полости вакуумирования [5]. Оказалось, что применение более производительного эжектора в качестве генератора вакуума позволяет роботу относительно надёжно и допустимо быстро закрепляться на поверхности не глубже 4 метров под водой, что накладывает ограничения на глубоководные рабочие зоны (осадка многих судов и кораблей значительно ниже указанной) функционирования данных типов роботов. Дальнейшие исследования по этому направлению будут направлены на поиск дополнительных решений по повышению эффективности предложенной конструкции при погружении робота на более существенные глубины.

Другой научной проблемой, поднятой в данных НИР, оказалась адаптация изображений подводной среды с камеры для эффективного восприятия информации оператором. При проведении подводной съёмки с помощью робота может встречаться ряд проблем, связанных с восприятием изображения оператором или непосредственно роботом. Эти проблемы связаны с особенностью искажения изображения в оптике фото-, видеокамер и получением изображения из более оптически плотной среды (воды) в менее оптически плотную (воздух в объективе камеры). Вызвано это высокой плотностью водной среды, по сравнению с воздушной средой, низкой естественной освещённостью, наличием в воде взвесей, эффектом рефракции световых волн. Основными негативными последствиями на изображениях становятся искажённая цветопередача, повышенная дисторсия и сни-



Рис. 9. Улучшение изображения путём эквализации гистограммы

женная чёткость изображений. В рамках НИР были разработаны алгоритмы, использующие преобразование перспективы [6], эквализацию гистограммы, которые позволили (рис. 9) эффективно улучшить качество изображения [7].

Третья часть исследований была связана с режимами работы гидродинамической системы очистки. Гидроструйная резка активно применяется в станкостроении, судостроении, однако там она работает в воздушной среде. В разрабатываемом же применении резка гидравлической струей должна оставаться эффективной как выше ватерлинии, так и под водой. Были проведены расчёты и математическое моделирование по следующим направлениям: определение зависимости площади очищаемой поверхности от изменения расстояния между форсункой и корпусом судна, определение зависимости напряжений сдвига от угла между поверхностью и режущей струей, определение влияния глубины погружения на создаваемое гидродинамическое напряжение сдвига. Результаты исследований [8] подтвердили предположение о эффективности работы системы гидродинамической очистки в обеих средах.

Выводы

На основании сказанного можно сделать вывод, что развитие подводной робототехники следует рассматривать достаточно широко, включая вопросы создания подводных технологических роботов на нетрадиционных для подводной робототехники принципах.

В частности, перспективным и экономически обоснованным является разработка и применение роботов для очистки корпусов судов от обрастаний. Данные роботы, изготовленные в соответствии с предложенным техническим обликом, смогут выполнять операцию очистки кораблей без необходимости дорогостоящей постановки их в сухой док.

Гранты и программы

Исследование выполнено в рамках НИР «Разработка облика перспективного робота для очистки корпусов судов от обрастаний» и «Поисковые исследования для создания компонентов РТК для очистки корпусов судов от обрастаний» при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» и темы государственного задания (№ госрегистрации АААА-А20-120011690138-6).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Albitar H., Ananiev A., Kalaykov I. In-water surface cleaning robot: concept, locomotion and stability // *International Journal of Mechatronics and Automation*. 2014. Vol. 4, No. 2. P. 104–115.
2. Albitar H., Dandan K., Ananiev A., Kalaykov I. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2016.
3. Ермолов И.Л., Князьков М.М., Семенов Е.А., Суханов А.Н. Перспективный мобильный робототехнический комплекс для проведения регламентных операций по очистке корпусов судов от обрастаний // *Морские интеллектуальные технологии*. 2023. Т. 1, № 2. С. 53–59.
4. Balashov V. S., Gromov B. A., I Ermolov. L., Roskilly A. P., Cleaning by means of the HISMAR autonomous robot // *Journal Russian Engineering Research*. 2011. Vol. 31, Issue 6. P. 589–592.
5. Бельченко Ф.М., Князьков М.М., Остриков П.П., Семенов Е.А., Суханов А.Н., Чашухин В.Г. Исследования газодинамических и гидродинамических процессов в полостях и каналах вакуумных захватных устройств // *Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та*. 2023. Т. 1, № 9. С. 15–21.
6. Бельченко Ф.М., Ермолов И.Л., Остриков П.П. Разработка программного модуля преобразования перспективы на видеоизображении для выбора и анализа элементов изображения // *Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та*. 2023. Т. 1, № 9. С. 2.
7. Бельченко Ф.М., Ермолов И.Л., Нагайцев Г.Н., Остриков П.П. Об особенностях передачи видеоизображений в подводной робототехнике // *Морские интеллектуальные технологии*. 2023. № 4. Ч. 3. С. 62–67.
8. Сиваков Н.С., Усанов В.А. Моделирование воздействия морского течения на мобильный робототехнический комплекс вблизи опорной поверхности // *Морские интеллектуальные технологии*. 2023. № 4. Ч. 3. С. 86–92.
9. Ермолов И.Л., Хрипунов С.П. Формирование обобщенной структурной схемы робототехнических комплексов // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2017. №1(14). С. 22–26.

Справка об авторе

ЕРМОЛОВ Иван Леонидович, д.т.н., профессор РАН, зам. директора
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
Адрес: Россия, 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1
E-mail: ermolov@ipmnet.ru
Тел.: (495) 4343547
ORCID: 0000-0002-8458-7982

APPLYING CLIMBING ROBOTS FOR HULL CLEANING

I.L. Ermolov

Traditionally underwater robotics deals with UAVs and ROVs. This paper discusses a new type of robot for this application - vertical climbing robots. This type of robots has traditionally been considered for terrestrial use. However recent developments have confirmed the effectiveness of using such robots for underwater research. The article describes the work carried out in the Laboratory of robotics and mechatronics of the Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS on using climbing robots for technological operations in the aquatic. In particular we discuss issues of creating a robotic system for cleaning ship hulls from fouling. This work was carried out jointly with the St. Petersburg State Marine Technical University.

Keywords: underwater exploration, climbing robots, underwater inspection, hull cleaning.

References

1. Albitar H., Ananiev A., Kalaykov I. In-water surface cleaning robot: concept, locomotion and stability. *International Journal of Mechatronics and Automation*. 2014. Vol. 4, No. 2. P. 104–115.
2. Albitar H., Dandan K., Ananiev A., Kalaykov I. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2016.
3. Ermolov I.L., Knjaz'kov M.M., Semenov E.A., Suhanov A.N. Perspektivnyj mobil'nyj robototekhnicheskij kompleks dlja provedenija reglamentnyh operacij po ochildke korpusov sudov ot obrastanij. *Morskije intelektual'nye tehnologii*. 2023. Vol. 1, No. 2. P. 53–59. (In Russ.).
4. Balashov V.S., Gromov B.A., I Ermolov. L., Roskilly A.P. Cleaning by means of the HISMAR autonomous robot. *Journal Russian Engineering Research*. 2011. Vol. 31, Issue 6. P. 589–592.
5. Bel'chenko F.M., Knjaz'kov M.M., Ostrikov P.P., Semenov E.A., Suhanov A.N., Chashhuhin V.G. Issledovanija gazodinamicheskij i gidro-

dinamicheskijh processov v polostjah i kanalah vakuumnyh zahvatnyh ustrojstv. *Izv. Volgograd. gos. tehn. un-ta*. 2023. Vol. 1, No. 9. P. 15–21. (In Russ.).

6. Bel'chenko F.M., Ermolov I.L., Ostrikov P.P. Razrabotka programmnogo modulja preobrazovanija perspektivy na videoizobrazhenii dlja vybora i analiza jelementov izobrazhenija. *Izv. Volgograd. gos. tehn. un-ta*. 2023. Vol. 1, No. 9. P. 2. (In Russ.).

7. Bel'chenko F.M., Ermolov I.L., Nagajcev G.N., Ostrikov P.P. Ob osobennostjah peredachi videoizobrazhenij v podvodnoj robototekhnike. *Morskije intelektual'nye tehnologii*. 2023. No. 4. Ch. 3. P. 62–67. (In Russ.).

8. Sivakov N.S., Usanov V.A. Modelirovanie vozdejstvija morskogo techenija na mobil'nyj robototekhnicheskij kompleks vblizi opornoj poverhnosti. *Morskije intelektual'nye tehnologii*. 2023. No. 4. Ch. 3. P. 86–92. (In Russ.).

9. Ermolov I.L., Hripunov S.P. Formirovanie obobshhennoj strukturnoj shemy robototekhnicheskijh kompleksov. *Robototekhnika i tehnicheskaja kibernetika*. 2017. No. 1(14). P. 22–26. (In Russ.).

Information about the author

ERMOLOV Ivan L., Dr. Sc., Prof. of RAS, Vice-Director Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences.

Address: Prospekt Vernadskogo 101-1, Moscow, 119526, Russia

Research Interests: Robotics

E-mail: ermolov@ipmnet.ru.

Phone: +7 495 4343547

ORCID: 0000-0002-8458-7982

