

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ПОДВОДНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИНСПЕКТИРОВАНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ КОРПУСА СУДНА ОТ БИООБРАСТАНИЯ

Ю.Н. Кульчин, А. Ю. Быканова, В.А. Гой, В.В. Костенко, А.И. Никитин, Е.П. Субботин

Морские организмы на подводной части корпуса корабля отрицательно влияют на его гидродинамические показатели. Обросшая биоорганизмами поверхность корпуса создает значительное увеличение сил лобового сопротивления при движении судна. При этом возрастает расход топлива на каждую морскую милю, что негативно влияет на скорость доставки грузов и стоимость их перевозки. Периодическая очистка подводной поверхности корпуса судна от биообрастания обеспечивает высокую экономичность его движения. Инспектирование и очистка подводной части судна на плаву выполняется водолазами, использующими подводную видеосистему, приборы неразрушающего контроля корпусных конструкций, а также инструменты очистки поверхностей от продуктов биологического обрастания и коррозии. Целью проведенного исследования являлась разработка подводного роботизированного комплекса для дистанционного освидетельствования и лазерной очистки подводных поверхностей корпусов судов и морских сооружений.

Особое внимание в статье уделено вопросам проектирования конструкции телеуправляемого необитаемого подводного аппарата и размещенного на нем модуля лазерной очистки. Конструкция аппарата спроектирована с учетом особенности его маневрирования под водой, обеспечивающей возможности инспектирования и очистки корпуса судна путем перемещения по его поверхности. Особенностью конструкции аппарата является оснащение его движительно-рулевого комплекса парой колесных движителей со встроенными магнитами, которая позволяет реализовать перемещение аппарата по стальной поверхности корпуса судна с требуемой скоростью не только под водой, но и на воздухе. Подводный модуль лазерной очистки, устанавливаемый на ТНПА в качестве полезной нагрузки, выполнен с использованием иттербиевого волоконного лазера YLR-15-1500-QCW-MM-ACи системы 2D-сканирования поверхностей IPGP 2DMid-PowerScanner. В статье приведены основные полученные технические решения комплекса, функциональные схемы, модели спроектированных устройств и фото изготовленного макетного образца подводного модуля. Результаты были получены при выполнении НИОКР «Разработка аппарата лазерной подводной очистки поверхностей от биообрастателей» (договор №258 ГРНТИС 5/35971) совместного проекта ИПМТ ДВО РАН и ИАПУ ДВО РАН.

Ключевые слова: лазерная подводная чистка, волоконный лазер, сканирующая оптическая система, биообрастание, инспектирование корпуса судна, телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, движительно-рулевой комплекс, система бортового управления и навигации

Введение

Важность борьбы с биообрастанием следует из экономических показателей эксплуатации судна, что напрямую связано с себестоимостью доставки грузов, а также длительностью эксплуатации морских гидротехнических сооружений и конструк-

ций. Биообрастание корпуса отрицательно влияет на гидродинамические характеристики судна в процессе эксплуатации, что приводит к ухудшению его ходовых свойств, снижению скорости и увеличению эксплуатационных затрат. Так, затраты на топливо составляют приблизительно 80 % эксплуатационных расходов любого корабля. Таким обра-



Рис. 1. Обрастание подводных поверхностей биоорганизмами:
а – подводная часть судна, б – свая пристани (Черное море)

зом, «гладкий» корпус является главным фактором экономической эксплуатации судна. С давних времен применение морского транспорта неразрывно связано с задачей борьбы с обрастанием подводных частей корпусов кораблей и пристаней различными биоорганизмами. Особенно это актуально при длительных стоянках судов в теплых морях. Столетиями морские специалисты боролись с паразитными для кораблей наростами морских ракушек различными способами: от механической чистки заросших участков до покрытия подводной части судна агрессивными составами против обрастания моллюсками и водорослями. Примеры морских обрастаний судна и столба причала приведены на рис. 1, а и 1, б соответственно.

Освидетельствование подводной части судна является обязательной процедурой по требованиям правил Российского морского регистра судоходства (РМРС) [1]. Как правило, инспекцию и очистку от обрастания корпуса и наружных подводных устройств судна проводят при его нахождении в сухом доке. Однако в отдельных случаях правила РМСР допускают выполнение этих работ без постановки судна в док (на плаву). Освидетельствование подводной части судна на плаву выполняется водолазами, использующими подводную видеосистему, приборы неразрушающего контроля корпусных конструкций, а также инструменты очистки поверхностей от продуктов биологического обрастания и коррозии. При этом обязательным является дистанционный контроль состояния осматриваемых объектов инспектором РМСР [2].

Со временем арсенал традиционных средств борьбы с обрастанием судов был дополнен различными, в том числе экзотическими, методами обработки

поверхностей: гидрокавитационная и пескоструйная очистка, применение сжатых газов, химическая обработка, охлаждение, ультразвуковое воздействие и пр. По сути, все усилия были сведены к поиску эффективного метода разрушения и удаления биообрастания. В последнее время было установлено, что среди существующих методов подводной очистки корпуса судна [3–11] лазерная очистка обладает рядом следующих преимуществ [12–19]:

- возможность селективной (выборочной) обработки изделия;
- удаление загрязнений при минимальном риске повредить металл;
- неконтактность и локальность воздействия;
- управляемость процессом путем программной регулировки параметров излучения;
- отсутствие расходных материалов;
- возможность получения высокой скорости обработки загрязненной поверхности.

Очевидна перспективность применения подводных роботизированных комплексов для освидетельствования и очистки подводной части корпуса судна. Анализ существующих решений этой задачи выявил наличие ряда комплексов инспекции и очистки подводных корпусных конструкций на базе телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА), приведенных на рисунках 2 и 3.

Целью проведенного исследования являлась разработка подводного робототехнического комплекса (ПРК) дистанционного освидетельствования и очистки судов с использованием лазерного излучения. Статья содержит введение, четыре раздела и заключение. В первом разделе описано тестирование технологии подводной лазерной очистки от

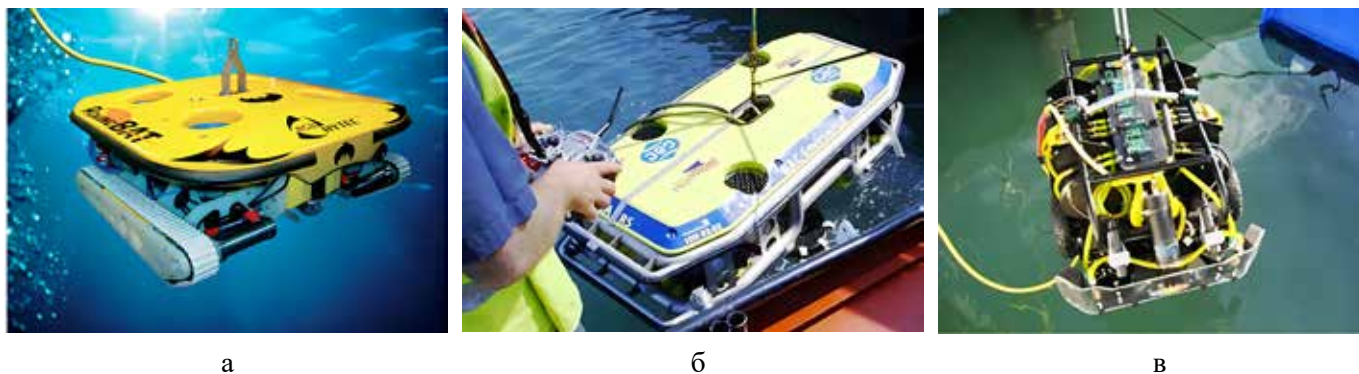


Рис. 2. ТНПА очистки обрастания корпуса судна с отдельными функциями инспектирования:
а – RovinBAT («ECA Hytec», Франция), б – GAC («GAC EnvironHull Limited», ОАЭ), в – Hull BUG («SeaRobotics», США)

биообрастания; во втором показаны результаты проектирования подводного модуля лазерной очистки. В третьем обоснован конструктивный облик ТНПА ПРК, обеспечивающий его использование по назначению, а также определены технические решения его движительно-рулевого комплекса, системы бортового управления и поста управления. Четвертый раздел посвящен экспериментальным исследованиям разрабатываемого комплекса.

1. Тестирование технологии подводной лазерной очистки от биообрастания

Процесс «лазерной очистки» подводной части поверхности корпусов морских объектов основан на взаимодействии лазерного пучка с биологическим материалом, в результате которого происходит термическое разложение и/или абляция органического вещества и его последующее удаление с поверхности

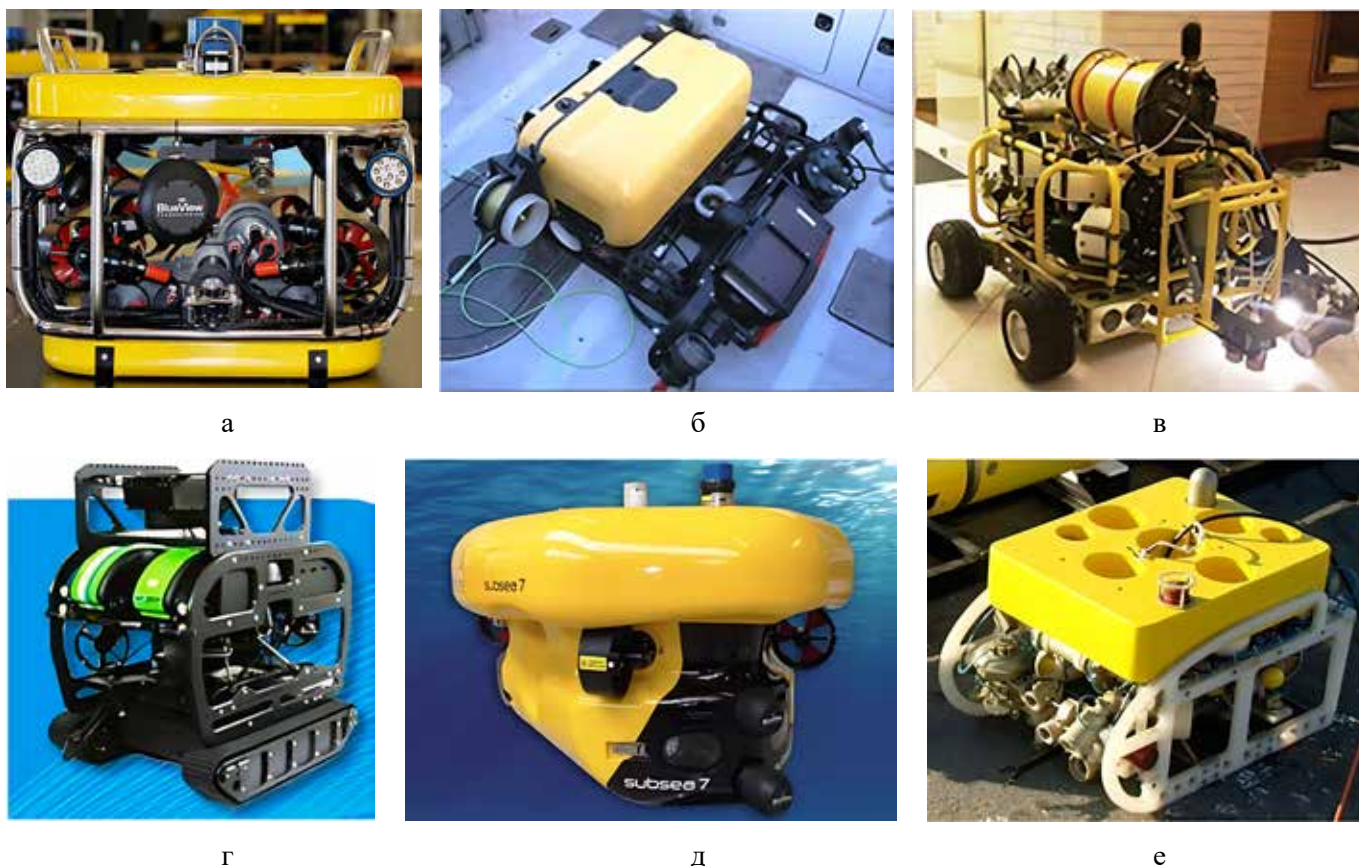
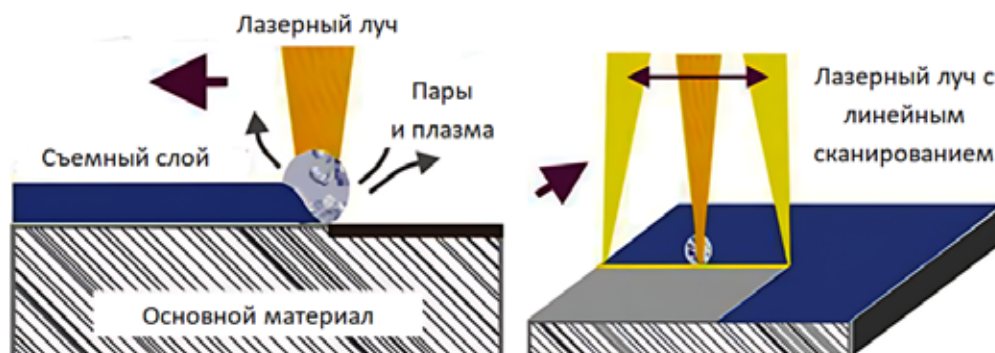


Рис. 3. ТНПА ПРК инспектирования корпуса судна без средств очистки от биообрастания:
а – V8 Sii («OceanModules», Швеция), б – HAUUV («BluefinRobotics», США), в – прототип ТНПА МГТУ им. Н.Э. Баумана (Россия), г – vLBC («SeaBotix», США), д – AIV («SubSea7», США), е – «Галтель-Т» (ИПМТ ДВО РАН, Россия)

Рис. 4. Техническая реализация лазерной очистки корпуса судна



объекта сжатым воздухом. Механизм физико-химического взаимодействия лазерного излучения (ЛИ) с биологическими тканями основан на их способности поглощать определенные длины волн электромагнитного излучения в определенных участках спектра оптического диапазона [14]. Проведенные исследования, направленные на решение задачи по созданию условий подводного взаимодействия лазерного излучения с биообъектами, находящимися во влажной среде, показали, что лазерный пучок должен находиться в «воздушном/газовом» пузыре [17]. При этом процесс удаления биообрастателей с подводной части поверхности объектов должен выполняться сканирующим (равномерно перемещающимся) лазерным пучком достаточной интенсивности в непрерывном (квазинепрерывном) или импульсном режиме. Технологию лазерной очистки поверхности поясняет рис. 4.

Интенсивность поглощения лазерного излучения при воздействии на поверхность твердого тела определяется коэффициентом поглощения, зависящим от множества факторов, в том числе от свойств материала и длины волны излучения. Оптимальное решение по выбору длины волны лазерного излучения для задач подводной лазерной очистки принималось с учетом поглощательной способности морской воды,

биоорганических материалов, красок, используемых для защиты подводной части поверхности корпусов морских объектов, и металлических материалов, используемых в судостроении. Анализ измеренных спектров поглощения оптического излучения основных представителей морских организмов, наиболее активно участвующих в процессах биообращения, показал, что в спектральном диапазоне 1400–1600 нм практически у всей исследуемой биоты наблюдается повышенное значение коэффициента поглощения [12–19]. Для сплавов, используемых в изготовлении корпусов судов, и лакокрасочных материалов, применяемых в качестве защитного покрытия, поглощение в этом диапазоне имеет достаточно низкие значения.

Предварительное тестирование технологии лазерной очистки было проведено на упрощенной модели устройства. Основу этой модели составляли иттербиевый волоконный лазер YLR-150/1500-QCW-MM-AC и сканирующая система 2D «IPG Mid-PowerScanner», оборудованная щелевым соплом для создания воздушно-газового пузыря между иллюминатором сопла и очищаемой поверхностью (см. рис. 5).

При проведении эксперимента были созданы полунатурные условия в опытовом бассейне Центра лазерных технологии (ЦЛТ) ИАПУ ДВО РАН. При

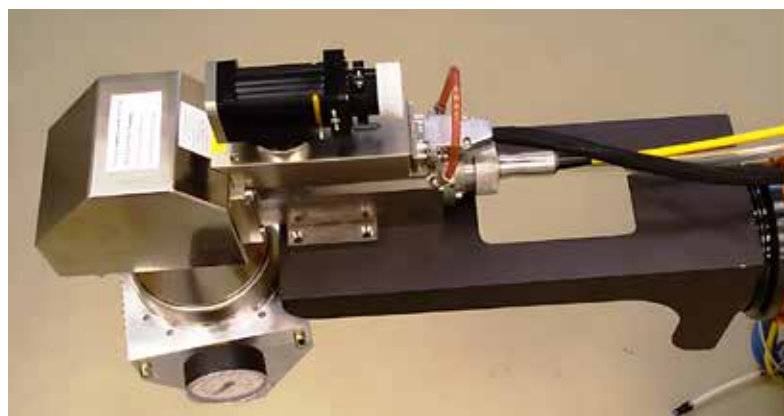


Рис. 5. Внешний вид щелевого сопла, установленного на сканирующую систему 2D «IPG Mid-PowerScanner»

этом для позиционирования испытуемого оборудования использовался промышленный манипулятор KUKA KR-30 HA. Целью эксперимента было определить оптимальные параметры технологического процесса подводной очистки. В ходе эксперимента поступательное движение сканирующей системы на заданном расстоянии относительно очищаемой поверхности обеспечивалось за счет изменения углов степеней подвижности манипулятора. Функциональная схема стендовых испытаний лазерного оборудования приведена на рис. 6, а на рис. 7 представлен фрагмент проведения эксперимента в ЦЛТ ИАПУ ДВО РАН.

В результате лабораторных исследований метода лазерной подводной очистки была установлена достаточная мощность непрерывного лазерного излучения 800 ± 200 Вт при линейной скорости сканирования 40 мм/с. При этом необходимое осушение объема между иллюминатором сканирующей головки и обрабатываемой поверхностью обеспечивалось давлением сжатого воздуха $0,4 \pm 0,2$ МПа. Результаты подводной лазерной очистки тестовой пластины от биообрастания, представленные на рис. 8, подтверждают правильность выбранных технических решений.

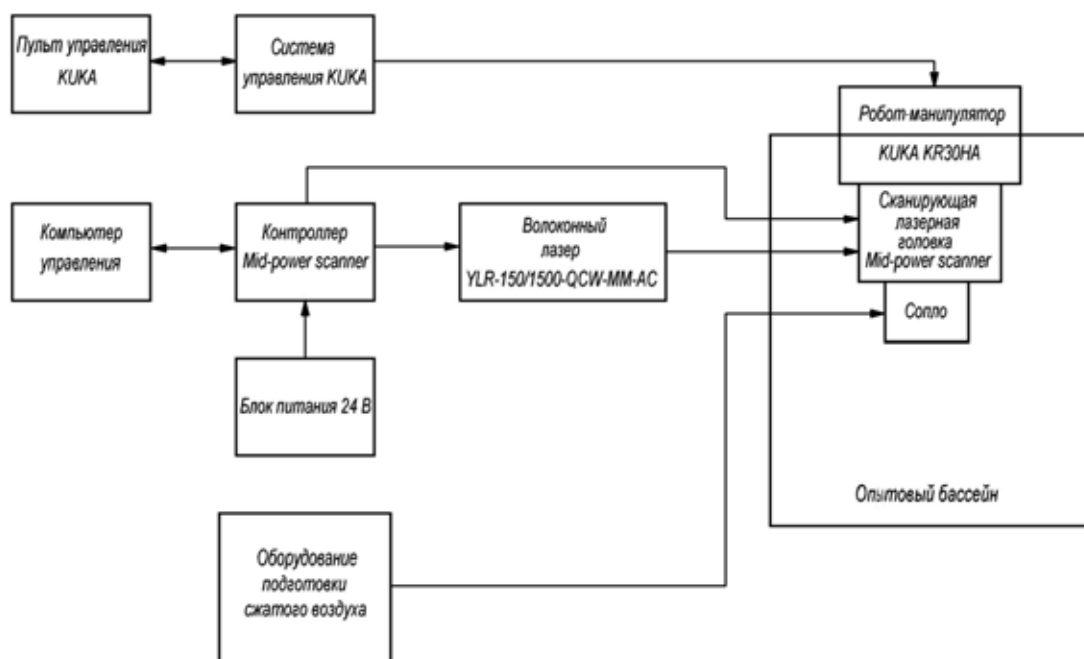


Рис. 6. Функциональная схема стендовых испытаний лазерного оборудования

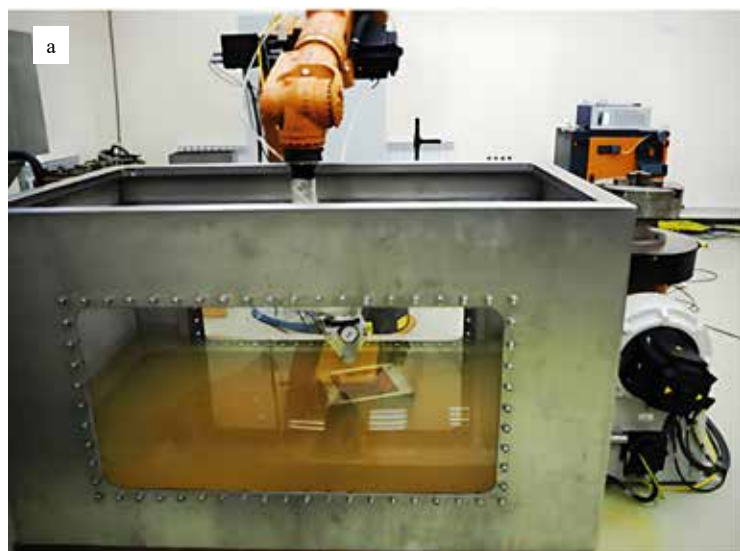


Рис. 7. Фрагменты экспериментальной очистки поверхностей от биообрастателей: а – общий вид установки лазерной очистки; б – очистка поверхности экспериментальной пластины от трубчатых многощетинковых морских червей в известковых домиках

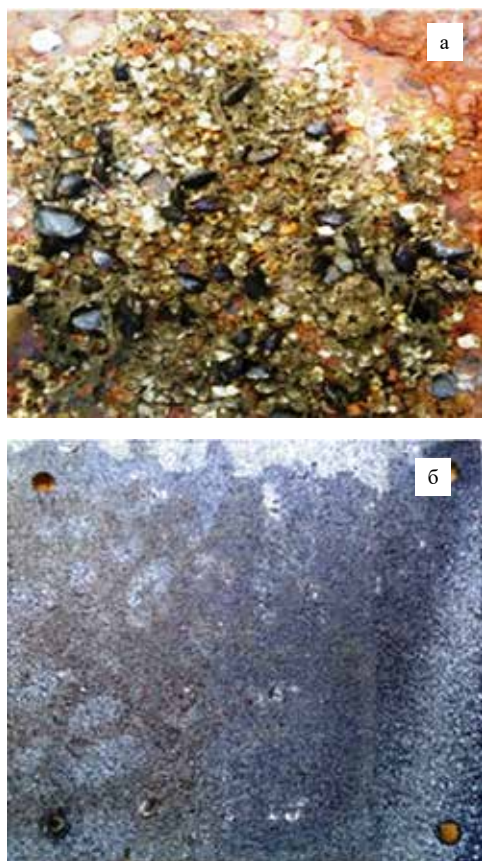


Рис. 8. Образцы поверхностей стальной пластины (фото предоставлено ЦКП ЛАМИ): а – до очистки; б – после очистки (мощность лазерного излучения – 1000 Вт, режим работы – непрерывный)

Таблица 1. Технические характеристики сканирующей системы 2D «IPGMid-PowerScanner»

Параметр	Значение
Длина волны	1030 – 1080 нм
Допустимая мощность лазерного излучения	1,5кВт
Диафрагма	12 мм
Тип разъема оптоволокну	HLC-8
Скорость сканирования	10 рад/с
Нестабильность	менее 1 мрад в течение 8 часов работы
Коллимирующая линза	50 мм
Фокусирующая линза	160 мм
Габаритные размеры ДхШхВ	276х100х120 мм
Масса	2,5 кг

2. Модуль лазерной очистки

Разработанный в ИПМТ ДВО РАН модуль лазерной очистки (МЛО) в своей основе содержит сканирующую систему 2D «IPG Mid-PowerScanner», обеспечивающую развертку излучения иттербиевого волоконного лазера YLR-150/1500-QCW-MM-AC, и предназначен для размещения на гибридном ТНПА, обладающем способностью перемещения по очищаемой поверхности корпуса судна как под водой, так и на воздухе. Основные технические характеристики 2D «IPG Mid-PowerScanner» приведены в табл. 1.

Управление перемещением лазерного пучка в плоскости XY производится с помощью программного обеспечения IPGWeldSoftware, установленного на ПК, и блока контроллера, подключенного к персональному компьютеру и сканеру.

Для исключения попадания морской воды в оптическую и электрическую части МЛО конструктивно все устройства были размещены в герметичном контейнере со встроенными опто-, электро- и пневмовводами. Для обеспечения выхода лазерного пучка во внешнюю среду на дне контейнера был размещен иллюминатор из кварцевого стекла. С целью увеличения эффективности технологии подводной лазерной очистки было спроектировано и установлено специализированное сопло, обеспечивающее создание воздушного потока, в котором происходит работа лазерного пучка вне герметичного корпуса. Перечень основного оборудования, размещенного в прочном контейнере модуля, следующий:

- а) сканирующая система (СС);
- б) герметичный ввод электрических цепей связи модуля СС с аппаратурой поста управления (блок контроллера- ScannerController);
- в) пневматический ввод воздушной магистрали (для обеспечения охлаждения);
- г) герметичный ввод оптоволокну волоконного лазера;
- д) выходной коннектор HLC-8, 50 мкм;
- е) датчики затекания;
- ж) АС-DC преобразователи напряжения, обеспечивающие энергоснабжение бортового оборудования ТНПА.

При этом необходимо было разработать максимально простую конструкцию, обеспечивающую надежное крепление всех компонентов модуля и удобство при сборке, монтаже и обслуживании. На основе выбранного оборудования и учета требований по обеспечению его работы разработана общая концепция функционирования и определены взаимосвязи элементов модуля между собой. На рис. 9 представлена функциональная схема МЛО.

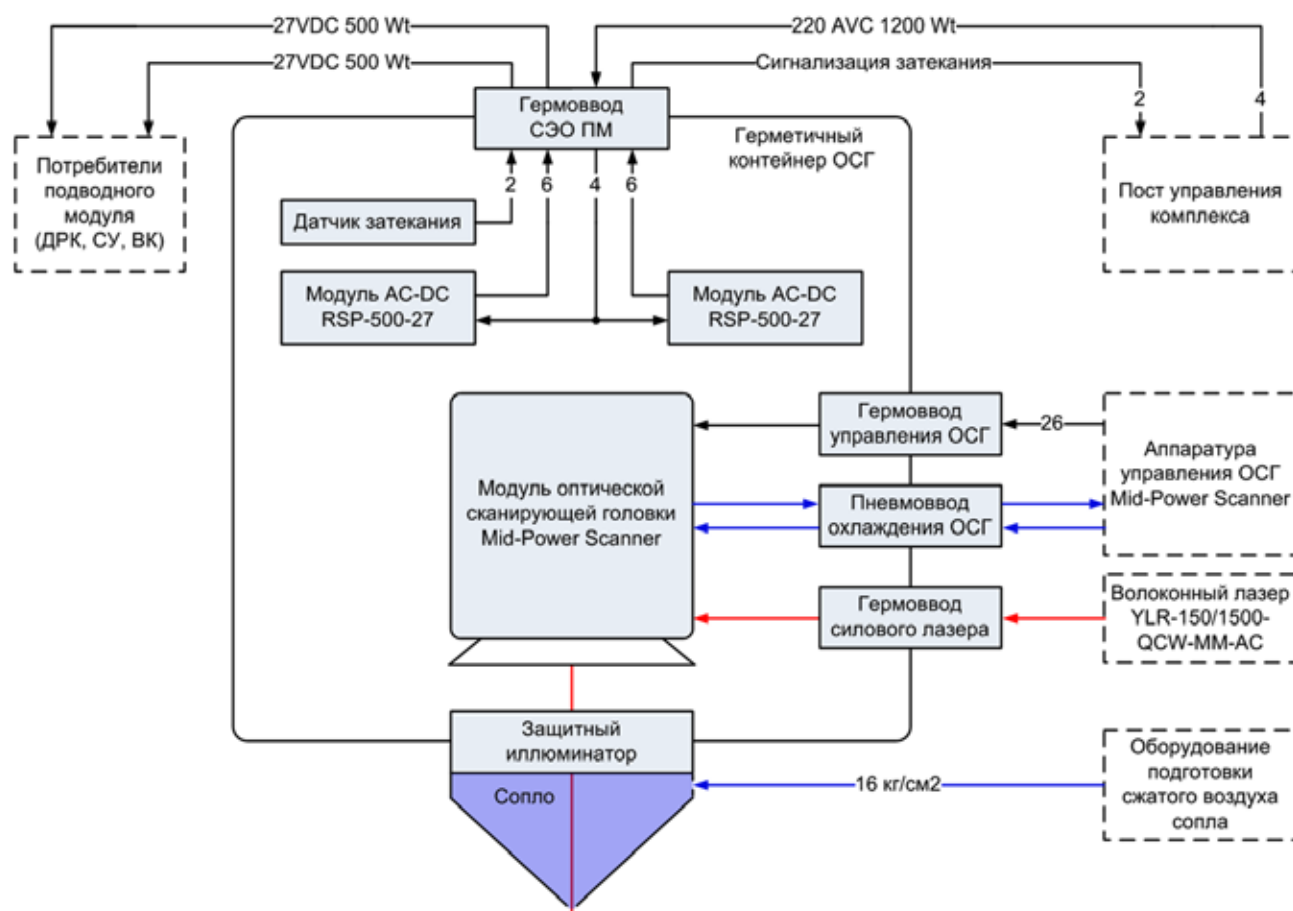


Рис. 9. Функциональная схема модуля лазерной очистки

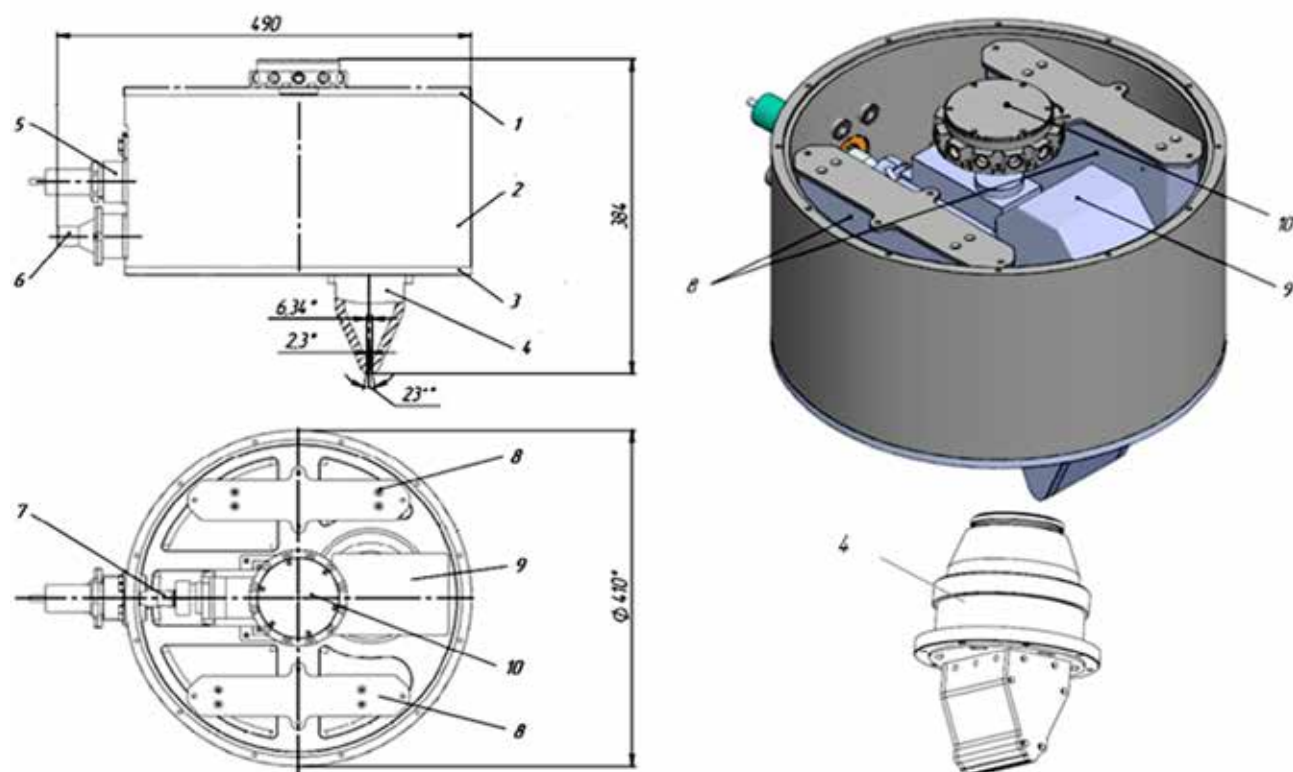


Рис. 10. Конструктивный облик модуля лазерной очистки (верхняя крышка условно прозрачная)

Конструктивный облик герметичного модуля лазерной очистки представлен на рис. 10, где приняты следующие обозначения: 1 – верхняя крышка (условно не показана) с расположенной на ней распределительной коробкой 10; 2 – корпус; 3 – нижняя крышка, 4 – сопло (показано в составе модуля и отдельно), 5 – оптический гермоввод, 6 – электрический гермоввод, 7 – выходной коннектор HLC-8, 50 мкм, 8 – AC/DC преобразователи напряжения, 9 – модуль сканирующей головки Mid-PowerScanner, 10 – распределительная коробка.

3. Технические решения ТНПА комплекса лазерной очистки

Представленный выше МЛЮ в подводном исполнении не способен без дополнительных технических средств позиционирования обеспечить качественную очистку и обследование корпуса судна, а работать лазерным модулем, управляемым водолазами, под водой запрещено из-за высокой степени травмоопасности. Для достижения положительных результатов по отработке технологии подводной чистки необходимо было обеспечить управляемые перемещения МЛЮ под водой с возможностью точного позиционирования и удержания на очищаемой поверхности. С целью решения этой задачи, а также для выполнения задач обследования состояния судового корпуса была разработана конструкция ТНПА, способного разместить МЛЮ в составе своей полезной нагрузки и обеспечить возможность устойчивого положения лазерного пучка относительно наклонного корпуса судна как под водой, так и на воздухе. Подобные технические решения, в которых небольшие подводные аппараты осмотрового класса оснащены специализированным оборудованием для выполнения очистки подводных поверхностей корпусов судов, полностью соответствуют «Правилам классификации и освидетельствования судов» [1, 2]. Наглядным примером такого решения является ТНПА RovinBAT («ЕСАНytec», Франция), показанный на рис. 2, а и принятый в качестве прототипа.

Основные требования по назначению ТНПА

Для определения состава требуемого оборудования был проведен анализ требований по назначению комплекса, который выявил необходимость использования ТНПА в следующих режимах работы:

- режим движения в толще воды с управляющими воздействиями гребных движителей движительно-рулевого комплекса (ДРК);

- режим подводного поступательного движения по горизонтальной или вертикальной поверхности корпуса судна с управляющими воздействиями от колесных и гребных движителей ДРК;
- режим поступательного движения по горизонтальной поверхности корпуса на воздухе с управляющими воздействиями от колесных движителей ДРК.

В режимах движения под водой ТНПА должен обеспечивать:

- маневрирование в горизонтальной плоскости в широком диапазоне скоростей хода и углов курса;
- маневрирование в вертикальной плоскости с разными скоростями и стабилизацией глубины погружения, а также углов крена и дифферента;
- поступательное движение по горизонтальной поверхности в диапазоне с регулированием скорости в диапазоне $0,01 \div 0,32$ м/с с возможностью реверсирования;
- компенсацию реакции воздушного потока системы осушения «сопла» модуля лазерной очистки упорами вертикальных гребных движителей;
- маневрирование по очищаемой поверхности с произвольным изменением направления движения, включая разворот на месте;
- контроль обстановки с помощью видеокамер переднего и заднего обзора;
- передачу на пост управления в реальном времени информации, поступающей от видеокамер, параметров движения ТНПА, определенных средствами системы бортового управления (СБУ);
- запись и накопление информации от видеокамер, навигационных датчиков и команд управления движением ТНПА с возможностью ее воспроизведения.

На воздухе ТНПА должен обеспечить:

- поступательное движение по горизонтальной поверхности с регулированием скорости в диапазоне $0,01 \div 0,32$ м/с с возможностью реверсирования;
- маневрирование по горизонтальной поверхности с произвольным изменением направления движения, включая разворот на месте;
- контроль обстановки с помощью видеокамер переднего и заднего обзора;
- передачу на пост управления в реальном времени информации, поступающей от видеока-

мер, параметров движения ПМ, определенных средствами СБУ;

- запись и накопление информации от видеокамер, навигационных датчиков и команд управления движением ПМ с возможностью ее воспроизведения.

Конструктивный облик ТНПА

Многолетний опыт ИПМТ ДВО РАН в проектировании и изготовлении подводных аппаратов, разработанный выше МЛО и анализ требований к желаемым перемещениям подводного аппарата позволили определить состав и функциональные связи его оборудования. Функциональная схема ТНПА комплекса приведена на рис. 11.

В разработке рассматриваемого ТНПА и постового оборудования комплекса были использованы технические решения узлов и систем, полученные при разработке и проверенные в лабораторных и натурных условиях подводных аппаратов как автономного, так и привязного типа. На рис. 12 представлен конструктивный облик спроектированного ТНПА, где несущая рама обеспечивает требуемое размещение четырех вертикальных движителей 1, блока плавучести 2, модуля лазерной очистки 3 и 11 (сопло

Таблица 2. Основные характеристики ТНПА

Наименование характеристики	Значение
Масса, кг	78
Габаритные размеры (длина/ширина/высота), мм	730/720/450
Мах глубина погружения, м	10
Скорость горизонтального хода в воде, м/с	0,6
Скорость вертикального хода, м/с	0,25
Скорость рыскания (в воде), град/с	±50
Скорость движения по поверхности, м/с	±0,40
Минимальная скорость движения по поверхности, м/с	±0,10
Диапазон регулирования угла крена, град	±45
Диапазон регулирования угла дифферента, град	±45
Мощность потребления не более, Вт	920
Сила сцепления магнитных колес со стальной поверхностью, кг	12
Диаметр кабеля связи, мм	8
Длина кабеля связи, м	20
Аппаратура связи	PLC adapter
Интерфейс связи ТНПА – пост управления	Ethernet

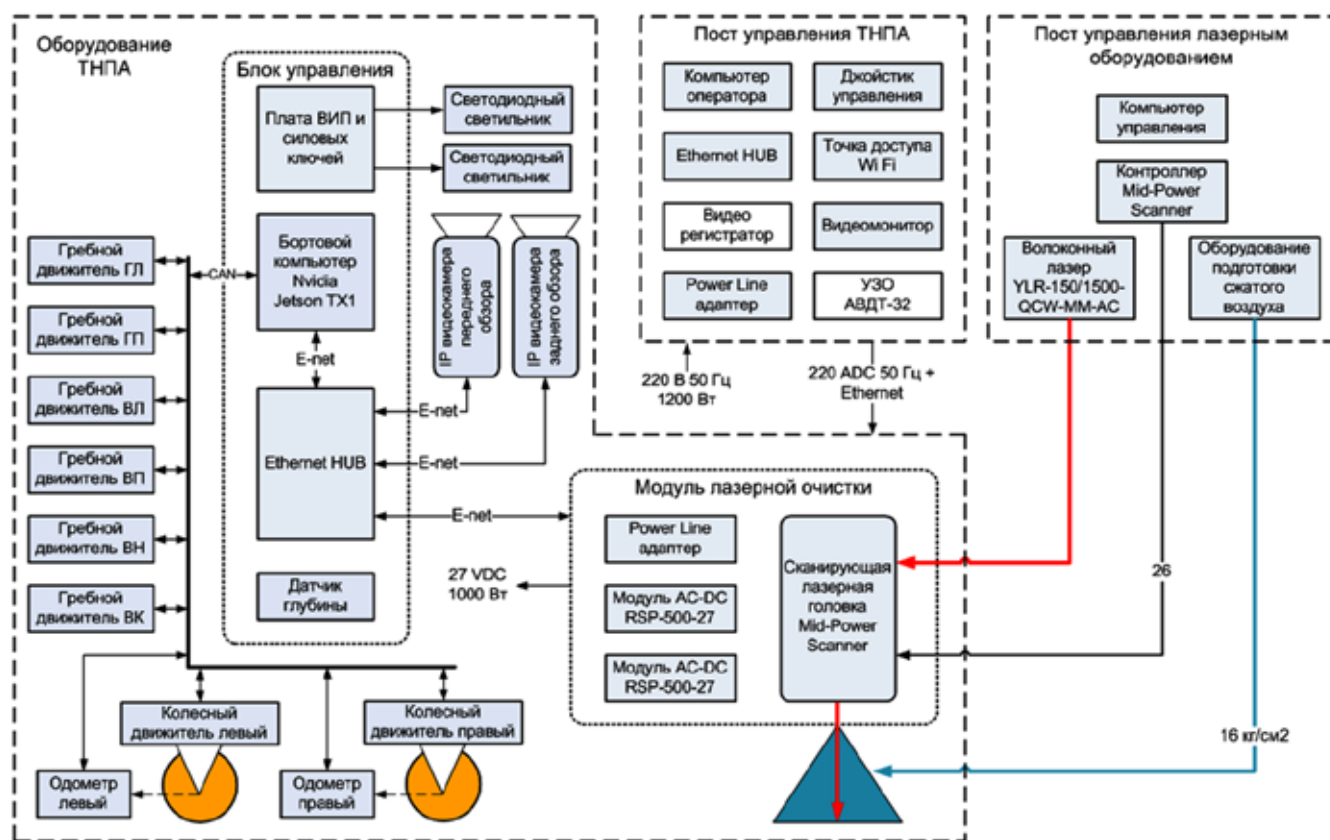


Рис. 11. Функциональная схема подводного робототехнического комплекса лазерной очистки корпуса судна на плавучем основании с возможностями инспектирования

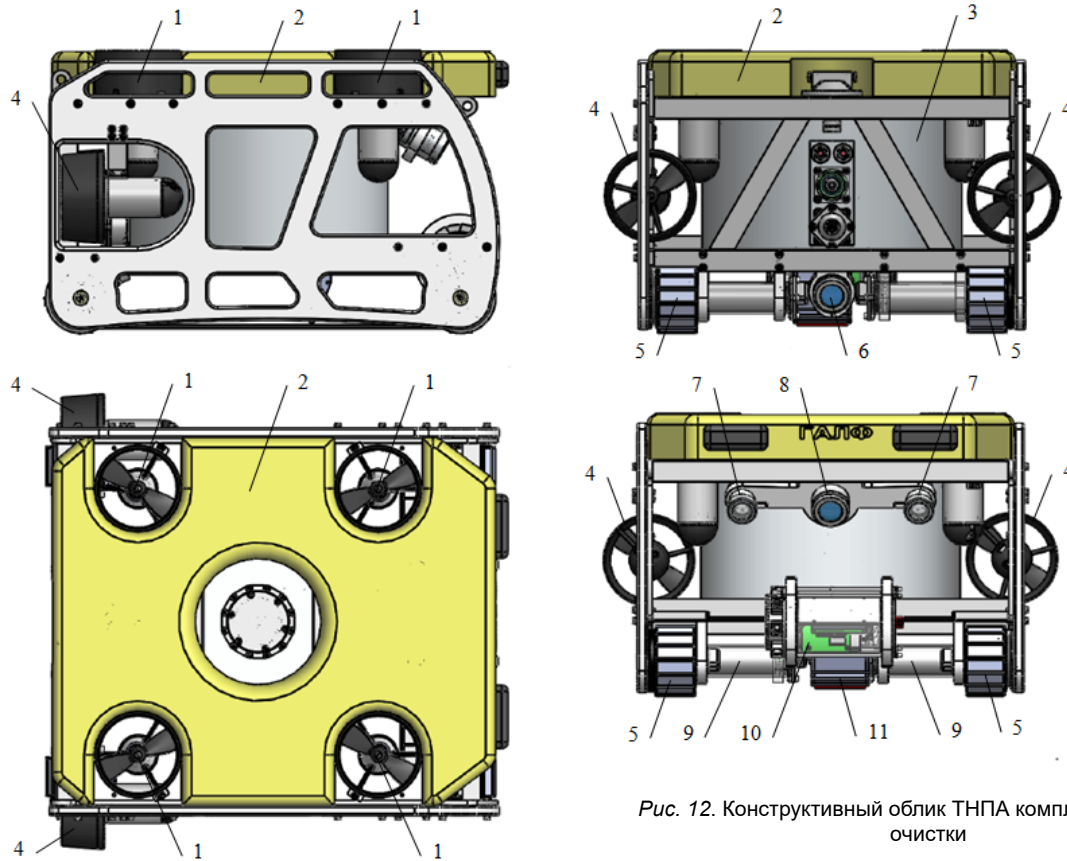


Рис. 12. Конструктивный облик ТНПА комплекса лазерной очистки

МЛО), двух горизонтальных движителей 4, колес со встроенными магнитами 5, задней видеокамеры 6, двух светодиодных светильников 7, передней видеокамеры 8, электропривода ведущего колеса 9 и блока управления 10. Основные технические характеристики аппарата приведены в табл. 2.

Движительно-рулевой комплекс

Движительно-рулевой комплекс (ДРК) обеспечивает маневрирование ТНПА в горизонтальной и вертикальной плоскостях с заданными скоростями хода, стабилизацию аппарата по углам курса, крена и дифферента, зависание на заданной глубине погружения и движение по обследуемой поверхности с компенсацией реакции системы осушения «сопла» модуля лазерной очистки. ДРК является программно-управляемым исполнительным комплексом и позволяет формировать управляющие силы и моменты для траекторного движения аппарата со стабилизацией глубины погружения, а также углов крена, курса и дифферента. ДРК работает в соответствии с командами блока управления (БУ), полученными в результате обработки команд оператора и сигналов навигационных датчиков и одометров колесных движителей.

На рис. 13 приведена компоновочная схема ДРК, обеспечивающая формирование следующих управляющих воздействий:

- два горизонтальных жестко закрепленных гребных движителя, расположенных вдоль продольной оси $O_m X$, позволяют в подводном положении создать регулируемые ходовую тягу T_x , а также управляющий момент по курсу M_y , обеспечивая аппарату маневрирование в горизонтальной плоскости;
- четыре вертикальных гребных движителя, расположенных в горизонтальной плоскости симметрично относительно вертикальной оси $O_m Y$, позволяют в подводном положении создавать необходимую вертикальную тягу T_y , а также моменты по дифференту M_z и по крену M_x , обеспечивая аппарату регулирование глубины погружения, углов крена и дифферента;
- каждый из двух колесных движителей связан со своим ведомым колесом ременной передачей, обеспечивающей синхронное вращения колес по бортам ТНПА. Регулированием движущих моментов колесных движителей обеспечивается поступательное движение и маневрирование аппарата по обрабатываемой поверхности как под водой, так и на воздухе.

Для увеличения сцепления со стальной поверхностью ведущие и ведомые колеса движителей снабжены магнитной системой.

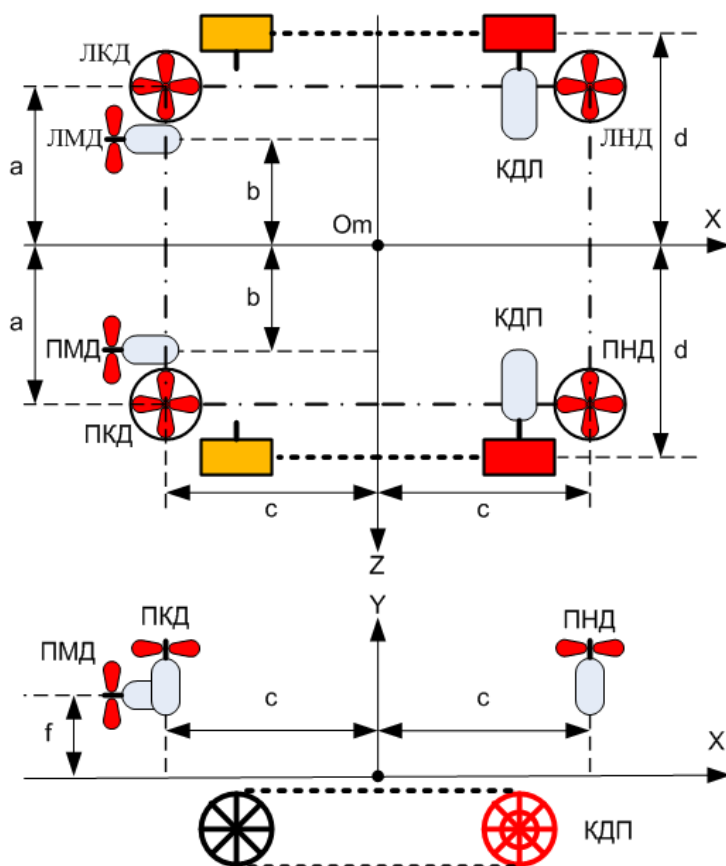


Рис. 13. Компонировочная схема ТНПА комплекса лазерной очистки

Связь управляющих сил и моментов ДРК с упорами, создаваемыми гребными движителями в подводном положении аппарата, соответствует выражению [19]:

$$\begin{aligned} T_x &= F_{\text{ЛМД}} + F_{\text{ПМД}}, \\ T_y &= F_{\text{ЛКД}} + F_{\text{ЛНД}} + F_{\text{ПКД}} + F_{\text{ПНД}}, \\ M_x &= a \cdot (F_{\text{ЛНД}} + F_{\text{ЛКД}} - F_{\text{ПКД}} - F_{\text{ПНД}}), \\ M_y &= b \cdot (F_{\text{ПМД}} + F_{\text{ЛМД}}), \\ M_z &= c \cdot (F_{\text{ЛНД}} + F_{\text{ПНД}} - F_{\text{ЛКД}} - F_{\text{ПКД}}) - f \cdot (F_{\text{ЛМД}} + F_{\text{ПМД}}); \end{aligned} \quad (1)$$

где: T_x , T_y – продольная и вертикальная тяга ДРК соответственно; M_x , M_y , M_z – управляющие моменты ДРК по крену, курсу и дифференту соответственно; a – плечо момента по крену; b – плечо курсового момента; c – плечо дифферентующего момента вертикальных гребных движителей; f – плечо дифферентующего момента маршевых гребных движителей; $F_{\text{ЛМД}}$, $F_{\text{ПМД}}$ – упоры, создаваемые маршевыми движителями; $F_{\text{ЛНД}}$, $F_{\text{ПНД}}$, $F_{\text{ЛКД}}$, $F_{\text{ПКД}}$ – упоры, создаваемые левым носовым, правым

носовым, левым кормовым и правым кормовым гребными движителями соответственно.

Связь управляющих сил и моментов ДРК с тягой, создаваемой колесными движителями в подводном и надводном положении соответствует выражению:

$$\begin{aligned} T_x &= F_{\text{КДЛ}} + F_{\text{КДП}}, \\ M_y &= d \cdot (F_{\text{КДП}} - F_{\text{КДЛ}}); \end{aligned} \quad (2)$$

где: $F_{\text{КДЛ}}$, $F_{\text{КДП}}$ – тяга левого и правого колесного движителя, соответственно; d – плечо курсового момента колесных движителей. ДРК имеет характеристики, приведенные в табл. 3.

Таблица 3. Основные характеристики движительно-рулевого комплекса

Наименование характеристики	Значение
Максимальная швартовая тяга гребных движителей, кг	5,7/4,8
Максимальная вертикальная тяга ДРК, кг	22,8/19,2
Максимальная горизонтальная тяга ДРК, кг	11,4/9,6
Максимальный момент ДРК по курсу, Н·м	28,3
Максимальный момент ДРК по крену, Н·м	44,2
Максимальный момент ДРК по дифференту, Н·м	41,2
Максимальные обороты колесных движителей, об/мин	50,4
Минимальные обороты колесных движителей, об/мин	1,5
Максимальный крутящий момент каждого колесного движителя, Н·м	5,9

Система бортового управления

В задачи, решаемые системой бортового управления (СБУ) ТНПА, входят:

- измерение глубины погружения;
- измерение угла магнитного курса;
- измерение углов крена и дифферента;
- измерение угловых скоростей по крену, дифференту и курсу;
- измерение параметров перемещения по обследуемой поверхности на основании данных от одометров колесных движителей;
- управление движением в толще воды и по очищаемой поверхности в ручном и автоматическом режимах;

- регулирование скорости перемещения по очищаемой поверхности;
- регулирование глубины погружения;
- регулирование углового положения аппарата по крену, курсу и дифференту;
- информационный обмен между модулем компьютера блока управления и мобильным компьютером поста управления в реальном масштабе времени;
- передача на пост управления в реальном времени информации, поступающей от бортовых видеокамер;
- сохранение параметров управления движением в «черном ящике» с возможностью воспроизведения и последующей обработки;
- оценка состояния аварийных датчиков устройств.

За основу структуры СБУ была принята структура автопилота гибридного АНПА «Чилим», разработанного в ИПМТ ДВО РАН. Сетевая организация устройств СБУ делает систему гибкой и открытой для последующих модернизаций. Использование в локальной сети протокола CAN обеспечивает наращиваемость системы и высокую способность системы к реконфигурации. Высокоскоростной канал связи Ethernet предназначен для связи бортового компью-

Таблица 4. Основные характеристики системы бортового управления ТНПА

Наименование характеристики	Значение
Диапазон/точность измерения магнитного курса, град	$\pm 180/\pm 1,5$
Диапазон/точность измерения углов крена и дифферента, град	$\pm 90/\pm 0,5$
Диапазон/точность измерения угловой скорости по крену, град/с	$\pm 250/\pm 0,5$
Диапазон/точность измерения скорости по курсу/крену/дифференту, град/с	$\pm 250/\pm 0,5$
Диапазон/дискретность измерения глубины погружения, м	$0\div 50/\pm 0,01$
Дискретность измерения пути колесного движителя, м	$5\cdot 10^{-5}$
Точность стабилизации магнитного курса, град	$\pm 2,5$
Точность стабилизации угла крена/дифферента, град	$\pm 1,0$
Точность стабилизации глубины погружения, м	$\pm 0,05$
Точность стабилизации заданной скорости перемещения под колесными движителями, м/с	$\pm 0,1$

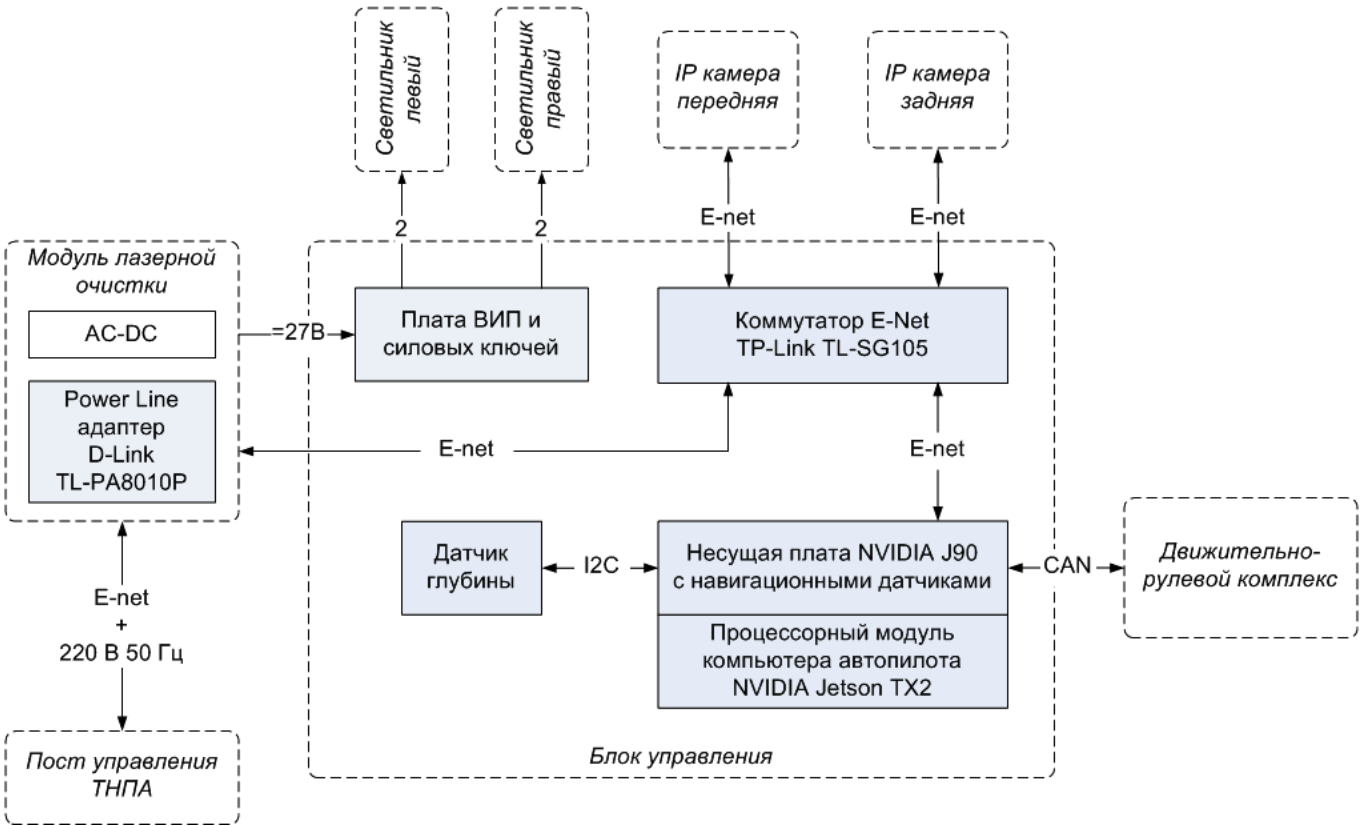


Рис. 14. Функциональная схема системы бортового управления ТНПА комплекса лазерной очистки

тера СБУ с компьютером оператора поста управления, находящимся на борту носителя. Функциональная схема СБУ показана на рис. 14, а ее основные технические характеристики сведены в табл. 4.



Рис. 15. Блок управления ТНПА комплекса лазерной очистки

Процессорный модуль, несущая плата компьютера СБУ вместе с коммутатором Ethernet и датчиком давления входят в состав блока управления, который размещен в собственном герметичном контейнере. Внешний вид блока управления показан на рис. 15.

Пост управления ТНПА

Пост управления (ПУ) ТНПА обеспечивает:

- управление всеми режимами движения ТНПА;

- управление оборудованием ТНПА;
- отображение, запись и накопление информации от видеокамер и навигационных датчиков, а также команд управления движением аппарата с возможностью ее воспроизведения;
- безопасное энергообеспечение систем ТНПА.

Функциональная схема ПУ показана на рис. 16, а состав сведен в табл. 5.

Таблица 5. Состав поста управления ТНПА

Наименование	Обозначение
Компьютер оператора	15.6" Ноутбук Lenovo 720-15IKBR
Джойстик управления	Dualshock 4 Cont Midnight Blue
Мышь беспроводная	Logitech Gaming Mouse G603
Power Line адаптер	D-Link TL-PA8010P
Видеомонитор	HP 19.5» Elite Display E202
Видео регистратор	RVi-HDR04LA-MV.2
Коммутатор Ethernet	TP-LINK TL-SG105
Точка доступа Wi-Fi (маршрутизатор)	D-Link DIR-825

4. Экспериментальные исследования макета ТНПА комплекса лазерной очистки

Испытание ТНПА и его систем проводились в три этапа. На первом проверялась правильность принятых технических решений и соответствие параметров движения требованиям технологии подводной лазерной очистки. При этом тестировались

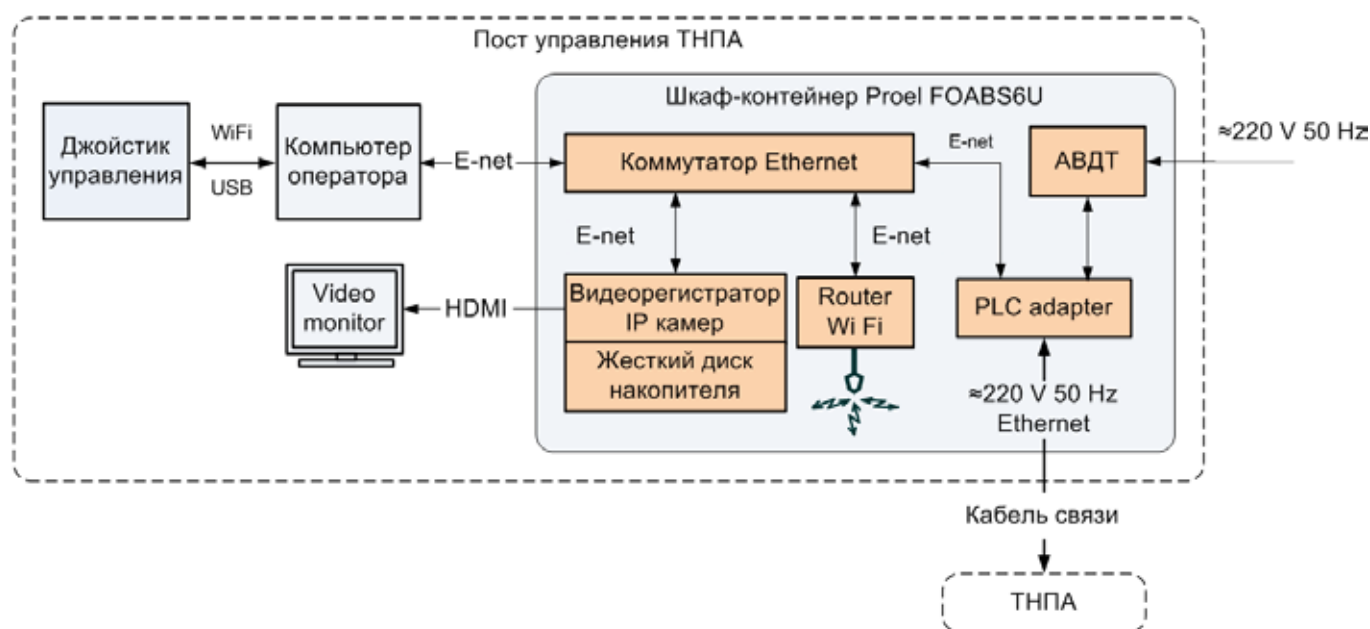


Рис. 16. Функциональная схема поста управления ТНПА

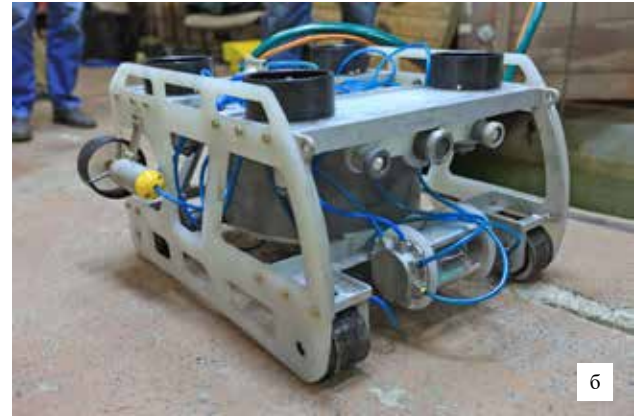


Рис. 17. Фрагменты испытаний ТНПА при движении на воздухе:
а – пост управления, б – движение ТНПА

все системы аппарата и проведена настройка регуляторов его движения на воздухе по горизонтальной поверхности. Фрагмент этих испытаний показан на рис. 17.

На втором этапе проводились испытания ТНПА в опытовом бассейне ИПМТ ДВО РАН. При этом проводилась настройка регуляторов движения аппарата

в толще воды, по дну бассейна и по его вертикальной металлической стенке. На рис. 18 приведены фрагменты этих испытаний.

На заключительном этапе испытывалось оборудование лазерной очистки в составе ТНПА. При этом аппарат обеспечивал поступательное перемещение лазерного сканера над очищаемой металлической

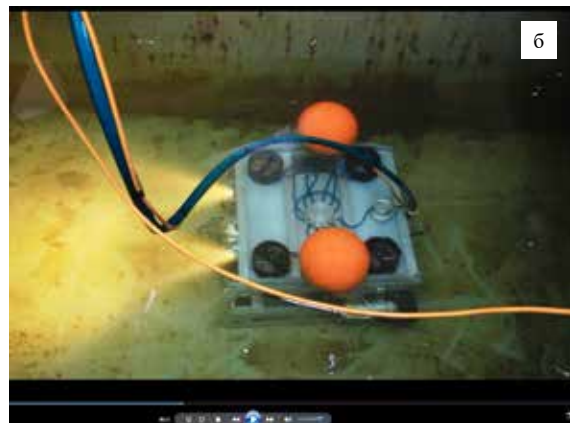


Рис. 18. Фрагменты испытаний ТНПА при движении под водой:
а – в толще воды, б – на дне бассейна, в – на вертикальной стенке бассейна

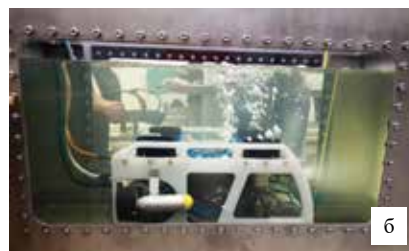


Рис. 19. Фрагменты испытаний ТНПА в режиме лазерной очистки экспериментальной пластины от биообрастателей:
а – общий вид комплекса; б – ТНПА в процессе очистки пластины от биообрастателей, в – участок пластины после очистки

пластиной в условиях экспериментального бассейна Центра лазерных технологий ИАПУ ДВО РАН. Фрагменты испытаний комплекса ТНПА в режиме лазерной очистки экспериментальной пластины от биообрастания иллюстрирует рис. 19.

Заключение

Предварительное проектирование роботизированного комплекса подводного инспектирования и лазерной очистки проводилось в рамках НИОКР по теме «Создание макета аппарата лазерной подводной очистки поверхности объектов от биообрастателей» (Заявка № НТИ-35234) по заказу «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере». При этом были получены следующие основные результаты:

1. Разработан подводный модуль лазерной очистки.
2. Подтверждена возможность применения лазерной технологии для борьбы с морским биообрастанием.
3. Разработан и испытан ТНПА с гибридным движительно-рулевым комплексом, обеспечивающим маневрирование аппарата как в толще воды, так и по очищаемой поверхности. При этом интегрированные в колесные движители магниты надежно удерживают аппарат при движении по стальной поверхности не только под водой, но и на воздухе.
4. Анализ результатов испытаний подтвердил правильность принятых технических решений и соответствие параметров движения ТНПА требованиям технологии подводной лазерной очистки.
5. Сетевая организация системы бортового управления ТНПА позволяет интегрировать в состав аппарата дополнительные устройства, решающие задачи инспектирования состояния корпуса судна (толщинометрии, измерения катодного потенциала и деформаций корпуса и т.п.).
6. Установлено, что целесообразно использовать источник лазерного излучения длиной волны в диапазоне 1.4...1.6 мкм, поскольку в этом случае наблюдается наиболее эффективное поглощение оптического излучения тканями биообрастателей. Полученная в результате исследований измерительная информация свидетельствует о том, что краски, используемые для защиты подводной части поверхности корпусов морских объектов, и конструкционные материалы корпусов судов наименее подвержены воздействию лазерного излучения в указанном диапазоне длин волн.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. НД №2-020101-012. СПб.: Рос. мор. регистр судоходства, 2015. 354 с.
2. Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. НД №2-030101-009. СПб.: Рос. мор. регистр судоходства, 2015. 245 с.
3. Iborra A. et al. A cost-effective robotic solution for the cleaning of ships' hulls // *Robotica*. 2010. Vol. 28, No. 3. P. 453–464.
4. Song C., Cui W. Review of underwater ship hull cleaning technologies // *Journal of marine science and application*. 2020. Vol. 19, No. 3. P. 415–429.
5. Song C., Cui W. Review of underwater ship hull cleaning technologies // *Journal of marine science and application*. 2020. Vol. 19, No. 3. P. 415–429.
6. LIMPIEZA PUROTECNICA S.A. Cavi-jet cavitation technologies and equipment. URL: <http://www.cavijet.com>. (Accessed on 20 Apr 2015).
7. Albitar H., Dandan K., Ananiev A., Kalaykov I. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion System / *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2016. P. 1–13. DOI: 10.5772/62060.
8. Soon Z. Y. et al. Seawater contamination associated with in-water cleaning of ship hulls and the potential risk to the marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 171. P. 112694.
9. Morrissey D. J., Woods C. In-water cleaning technologies: review of information. 2015.
10. Yuan, F.-C., Guo, L.-B., Meng, Q.-X. and Liu, F.-Q. The design of underwater hull-cleaning robot // *Journal of Marine Science and Applications*. Vol. 3, No. 1. P. 41–45.
11. Lee M. H. et al. Hydrodynamic design of an underwater hull cleaning robot and its evaluation // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2012. Vol. 4, No. 4. P. 335–352.
12. Oltra R. et al. Modeling and diagnostics of pulsed laser-solid interactions: applications to laser cleaning // *High-Power Laser Ablation II*. SPIE. 2000. Vol. 3885. P. 499–508.
13. Veiko V.P., Shakhno E.A. Physical mechanisms of laser cleaning // *Laser cleaning*. 2002. P. 311–340.
14. Беликов А.В., Пушкарёва А.Е., Скрипник А.В. Теоретические и экспериментальные основы лазерной абляции биоматериалов. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 118 с.
15. Beiko V.P., Samokhvalov A.A. Analysis of the mechanism of laser ablation under a liquid layer on the basis of the thermo-fluctuation theory of fracture // *Journal of Instrument Engineering*. 2014. Vol. 57, No. 6. P. 54–58.
16. Кульчин Ю.Н., Звягинцев А.Ю., Субботин Е.П., Масленников С.И., Бегун А.А. Перспективы и технико-экономические аспекты разработки новых методов контроля биообрастания на морском транспорте // *Вестник ДВО РАН*. 2015. № 6. С. 96–102.
17. Кульчин Ю. Н., Никитин А. И., Субботин Е. П. Лазерная подводная очистка корпусов морских судов // *Прикладная фотоника*. 2020. Т. 7, № 4. С. 86–101.
18. Kostenko V.V., Bykanova A.Y., Tolstonogov A.Y. Underwater Robotics Complex for Inspection and Laser Cleaning of Ships from Biofouling // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019. Vol. 272, No. 2. P. 022103.
19. Bykanova A.Y., Kostenko V.V., Tolstonogov A.Y. Development of the Underwater Robotics Complex for Laser Cleaning of Ships from Biofouling: Experimental Results // *E&ES*. 2020. Vol. 459, No. 3. P. 032061.

Для цитирования:

Кульчин Ю.Н., Быканова А.Ю., Гой В.А., Костенко В.В., Никитин А.И., Субботин Е.П. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ПОДВОДНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИНСПЕКТИРОВАНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ КОРПУСА СУДНА ОТ БИООБРАСТАНИЯ // *Подводные исследования и робототехника*. 2025. № 4 (54). С. 4–21. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_54_04_01. EDN: MVBKIS.

Сведения об авторах:

КУЛЬЧИН Юрий Николаевич, д.ф.-м.н., академик РАН
Дальневосточное отделение РАН, председатель
Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного
отделения Российской академии наук, научный руководитель
Адрес: 690091, Россия, г. Владивосток, улица Светланская, 50.
Научные интересы: лазерная физика, оптическая обработка ин-
формации, физическая и нелинейная оптика, фотоника нано- и
микроструктур, фотонные сенсоры и нанотехнологии, биофо-
тоника.
Тел.: +7 (423) 222-87-50,
E-mail: delo@hq.febras.ru
SPIN-код: 9536-7029
ORCID: 0000-0002-8750-4775
Researcher ID: J-9058-2014
Scopus ID: 7003382956

БЫКАНОВА Анна Юрьевна, к.т.н., старший научный сотруд-
ник Лаборатории исполнительных устройств и систем телеу-
правления (№ 43)
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ин-
ститут проблем морских технологий ДВО РАН им. академика
М.Д. Агеева
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: vladiana@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3040-1345

ГОЙ Владислав Александрович, ведущий конструктор Лабо-
ратории исполнительных устройств и систем телеуправления
(№ 43)
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ин-
ститут проблем морских технологий ДВО РАН им. академика
М.Д. Агеева
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: prim-pkb@mail.ru

КОСТЕНКО Владимир Владимирович, к.т.н., ведущий на-
учный сотрудник, заведующий лабораторией исполнительных
устройств и систем телеуправления (№ 43)
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ин-
ститут проблем морских технологий им. академика М.Д. Аге-
ева Дальневосточного отделения Российской академии наук.
Адрес: 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а.
Научные интересы: Подводная робототехника, системы управ-
ления движением, движительно-рулевые комплексы, динами-
ческие модели, буксируемые системы
Тел.: +7 (984) 145-43-85,
E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru
SPIN-код: 2310-3141
ORCID: 0000-0002-3821-3787
Researcher ID: AAF-6399-2021
Scopus ID: 57189036440

НИКИТИН Александр Иванович, руководитель центра ин-
женерных разработок ИАПУ ДВО РАН (ведущий инженер
Лаборатории прецизионных оптических методов измерений
(№ 21))
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ин-
ститут автоматизации и процессов управления Дальневосточного
отделения Российской академии наук.
Адрес: 690041, г. Владивосток, улица Радио, дом 5.
Научные интересы: лазерная физика, взаимодействие лазерного
излучения с веществом
Тел.: +7 (924) 244-04-75,
E-mail: anikitin@iacp.dvo.ru
SPIN-код: 1529-4105
ORCID: 0000-0003-2901-7482
Researcher ID: AAD-8450-2022
Scopus ID: 57194274354

СУББОТИН Евгений Петрович, к.ф.-м.н., ведущий научный
сотрудник Лаборатории прецизионных оптических методов
измерений (№ 21), заведующий сектором лазерных технологий
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ин-
ститут автоматизации и процессов управления Дальневосточного
отделения Российской академии наук.
Адрес: 690041, г. Владивосток, улица Радио, дом 5.
Научные интересы: взаимодействие лазерного излучения с ве-
ществом, биофотоника.
Тел.: +7 (423) 231-06-97,
E-mail: s.e.p@list.ru
SPIN-код: 3816-7270
ORCID: 0000-0002-8658-3504
Researcher ID: U-4166-2019
Scopus ID: 57063130500



DEVELOPMENT OF AN UNDERWATER ROBOTIC COMPLEX FOR INSPECTION AND LASER CLEANING OF A SHIP'S HULL FROM BIOFOULING

Yu.N. Kulchin, A.Yu. Bykanova, V.A. Goj, V.V. Kostenko, A.I. Nikitin, E.P. Subbotin

Shell growths on the underwater part of a ship's hull negatively affect its hydrodynamic performance. A hull overgrown with bioorganisms creates a significant increase in drag forces when the vessel is moving. At the same time, fuel consumption per nautical mile increases, which negatively impacts the speed of cargo delivery and the cost of their transportation. Periodic cleaning of the vessel's hull from biofouling ensures high efficiency of its movement. Inspection and cleaning of the underwater part of the vessel while afloat is carried out by divers using an underwater video system, non-destructive testing devices for hull structures, as well as tools for cleaning surfaces from biological fouling and corrosion products. The aim of the study was to develop an underwater robotic system for remote inspection and cleaning of ships using laser radiation. The article pays special attention to the design of a remotely controlled unmanned underwater vehicle and a laser cleaning module placed on it. The ROV is designed taking into account the peculiarities of its maneuverability under water, providing the ability to inspect and clean the vessel's hull by moving along its surface. A special feature of the design of the device is that its propulsion and steering system is equipped with a pair of wheeled propellers with built-in magnets, which allows the device to move along the steel surface of the ship's hull at the required speed not only underwater, but also in the air. The underwater laser cleaning module, installed on the ROV as a payload, is made using the YLR-15-1500-QCW-MM-AC ytterbium fiber laser and the IPGP 2D Mid-Power Scanner 2D surface scanning system. The article presents the main technical solutions obtained for the complex, functional diagrams, models of the designed devices and a photo of the manufactured prototype of the ROV. The results were obtained during the R&D work "Development of a device for underwater laser cleaning of surfaces from biofouling" (contract No. 258 GRNTIS 5/35971) of the joint project of the IMTP FEB RAS and the IACP FEB RAS.

Keywords: underwater laser cleaning, ytterbium fiber laser, scanning optical system, biofouling, ship hull inspection, remotely operated unmanned underwater vehicle, propulsion and steering system, on-board control system

References

1. Ros. mor. registr sudohodstva ND №2-020101-012 (2015). Pravila klassifikacionnyh osvidetel'stvovaniy sudov v ekspluatatsii [Rules for classification surveys of ships in operation], St. Petersburg, Russia, (in Russian).
2. Ros. mor. registr sudohodstva ND №2-030101-009 (2015). Ru-kovodstvo po tekhnicheskomu nablyudeniyu za sudami v ekspluatatsii [Guidelines for technical supervision of ships in service], St. Petersburg, Russia, (in Russian).
3. Iborra A. et al. A cost-effective robotic solution for the cleaning of ships' hulls // *Robotica*. 2010. Vol. 28, No. 3. P. 453–464.
4. Song C., Cui W. Review of underwater ship hull cleaning technologies // *Journal of marine science and application*. 2020. Vol. 19, No. 3. P. 415–429.
5. Song C., Cui W. Review of underwater ship hull cleaning technologies // *Journal of marine science and application*. 2020. Vol. 19, No. 3. P. 415–429.
6. LIMPIEZA PUROTECNICA S.A. Cavi-jet cavitation technologies and equipment. URL: <http://www.cavijet.com>. (Accessed on 20 Apr 2015).
7. Albitar H., Dandan K., Ananiev A., Kalaykov I. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion System // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2016. P. 1–13. DOI: 10.5772/62060.
8. Soon Z. Y. et al. Seawater contamination associated with in-water cleaning of ship hulls and the potential risk to the marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 171. P. 112694.
9. Morrissey D. J., Woods C. In-water cleaning technologies: review of information. 2015.
10. Yuan, F.-C., Guo, L.-B., Meng, Q.-X. and Liu, F.-Q. The design of underwater hull-cleaning robot // *Journal of Marine Science and Applications*. Vol. 3, No. 1. P. 41–45.
11. Lee M. H. et al. Hydrodynamic design of an underwater hull cleaning robot and its evaluation // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2012. Vol. 4, No. 4. P. 335–352.

12. Oltra R. et al. Modeling and diagnostics of pulsed laser-solid interactions: applications to laser cleaning // High-Power Laser Ablation II. SPIE. 2000. Vol. 3885. P. 499–508.
13. Veiko V.P., Shakhno E.A. Physical mechanisms of laser cleaning // Laser cleaning. 2002. P. 311–340.
14. Belikov A.V., Pushkaryova A.E., Skripnik A.V. Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy lazernoj ablyacii biomaterialov [Theoretical and experimental principles of laser ablation of biomaterials], SPbSU ITMO Publ., St. Petersburg, Russia, 2011. P. 118. (in Russian).
15. Beiko, V. P., & Samokhvalov, A. A. Analysis of the mechanism of laser ablation under a liquid layer on the basis of the thermo-fluctuation theory of fracture. Journal of Instrument Engineering. 2014. Vol. 57, No. 6. P. 54–58.
16. Kul'chin Yu.N., Zvyaginets A.Yu., Subbotin E.P., Maslennikov S.I., Begun A.A. Perspektivy i tekhniko-ekonomicheskie aspekty razrabotki novykh metodov kontrolya bioobrastaniya na morskoy transporte [Prospects and technical and economic aspects of developing new methods for

controlling biofouling in maritime transport], Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2015. No. 6. P. 96–102. (In Russian).

17. Kul'chin Yu. N., Nikitin A. I., Subbotin E. P. Lazernaya podvodnaya ochkistka korpusov morskikh sudov [Underwater laser cleaning of marine vessel hulls], Applied Photonics. 2020. Vol. 7, No. 4. P. 86–101. (in Russian)

18. Kostenko, V. V., Bykanova, A. Y., & Tolstonogov, A. Y. (2019, June). Underwater robotics complex for inspection and laser cleaning of ships from biofouling. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. Vol. 272, No. 2. P. 022103.

19. Bykanova, A. Y., Kostenko, V. V., & Tolstonogov, A. Y. Development of the underwater robotics complex for laser cleaning of ships from biofouling: Experimental results. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020. Vol. 459, No. 3. P. 032061.

Information about authors

KULCHIN Yu.N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chairman of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (RAS), Academician of the RAS, Scientific Supervisor of the Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 50 Svetlanskaya Street, Vladivostok, 690091, Russia.
Research Interests: laser physics, optical data processing, physical and nonlinear optics, photonics of nano- and microstructures, photonic sensors and nanotechnology, biophotonics.
Phone: +7 (423) 222-87-50
E-mail: delo@hq.febras.ru
SPIN-code: 9536-7029
ORCID: 0000-0002-8750-4775
ResearcherID: J-9058-2014
ScopusID: 7003382956

BYKANOVA A.Yu., Ph.D., Senior Researcher of actuating devices and remote control system laboratory (No. 43)
M.D. Ageev Institute for Marine Technology Problems FEB RAS
Address: 5a, Sukhanov Str., Vladivostok, 690950
Research interests: underwater robotics, unmanned underwater vehicle, manipulation device, docking system
Phone: +7 (423) 243-24-16
E-mail: vladianna@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3040-1345

GOJ V.A., Leading designer of actuating devices and remote control system laboratory (No. 43)
M.D. Ageev Institute for Marine Technology Problems FEB RAS
Address: 5a, Sukhanov Str., Vladivostok, 690950
Research interests: underwater robotics, unmanned underwater vehicle, manipulation device, docking system
Phone: +7 (423) 243-24-16
E-mail: prim-pkb@mail.ru

KOSTENKO V.V., Ph.D., leading researcher, head laboratory of actuating devices and remote control system (No. 43)
Federal State Budgetary Institution of Science M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences
Address: 5a, Sukhanov Str., Vladivostok, 690950
Scientific interests: Underwater robotics, motion control systems, propulsion and steering systems, dynamic models, towed systems
Phone: +7 (984) 145-43-85
E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kostenko@mail.ru
SPIN-code: 2310-3141
ORCID: 0000-0002-3821-3787
Researcher ID: AAF-6399-2021
ScopusID: 57189036440

NIKITIN A.I., Head of the Engineering Development Center at the IACP FEB RAS (leading engineer at the Laboratory of Precision Optical Measurement Methods (No. 21))
Federal State Budgetary Scientific Institution, Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.
Address: 5 Radio Street, Vladivostok, 690041, Russia.
Research Interests: laser physics, laser-matter interaction.
Phone: +7 (924) 244-04-75,
E-mail: anikitin@iacp.dvo.ru
SPIN-code: 1529-4105
ORCID: 0000-0003-2901-7482
Researcher ID: AAD-8450-2022
ScopusID: 57194274354

SUBBOTIN E.P., Ph.D., Leading Research Scientist of the Laboratory of Precision Optical Measurement Methods (No. 21), Head of the Laser Technologies Sector
Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 5 Radio Street, Vladivostok, 690041, Russia.
Research Interests: laser-matter interaction, biophotonics.
Phone: +7 (423) 231-06-97
E-mail: s.e.p@list.ru
SPIN-code: 3816-7270
ORCID: 0000-0002-8658-3504
ResearcherID: U-4166-2019
Scopus ID: 57063130500