Гладкова О.И.
НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ СРЕДСТВАМИ ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ БЕЗДОКОВОГО ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЯ КОРПУСОВ СУДОВ

Анализ применимости необитаемых подводных аппаратов с комбинированными средствами движения для бездокового освидетельствования корпусов судов проведен на основе требований нормативных документов к методике освидетельствования и параметрам дефектоскопии (Российский морской регистра судоходства, Российский речной регистр, ГОСТ Р 55724-2013 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые», ASTM E1961 – 16 Standard Practice for Mechanized Ultrasonic Examination of Girth Welds Using Zonal Discrimination with Focused Search Units). На основе требований нормативных документов к процедуре освидетельствования сформулированы требования к конструкции, измерительному комплексу и параметрам движения необитаемого подводного аппарата. В результате работы с созданной математической моделью НПА с дополнительными колесными движителями предложены оригинальные алгоритмы системы управления движением. Результаты проверки разработанных алгоритмов (как в рамках имитационного моделирования, так и последующих натурных испытаний опытного образца аппарата) подтвердили целесообразность их применения и позволили выявить области их дальнейшего совершенствования. Предложено робототехническое средство нового класса для выполнения наиболее полного спектра работ по освидетельствованию корпусов судов без постановки в сухой док, не имеющее аналогов в России на текущий момент. Целесообразность применения необитаемых подводных аппаратов с комбинированными средствами движения подтверждена результатами математического моделирования криволинейного движения и натурных испытаний. Намечены пути дальнейшего усовершенствования разработанных алгоритмов системы управления НПА.

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, бездоковое освидетельствование корпуса судна, комбинированные средства движения.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Гладкова О.И. Применение необитаемых подводных аппаратов с комбинированными средствами движения для бездокового освидетельствования корпусов судов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; специальный выпуск 1: 213–223.

УДК 629.57+551.46 DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-213-223

Gladkova O.
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

APPLICATION OF HYBRID PROPULSION UUV FOR SHIP HULL SURVEY WITHOUT DRY DOCKING

Feasibility of using hybrid-propulsion unmanned underwater vehicles (UUV) for in-water surveys of ship hulls is analyzed based on regulatory documentation regarding survey methods and NDT specifications (Russian Maritime Register of Shipping, Russian River Register, GOST P 55724-2013 «Non-destructive testing. Welded joints. Ultrasonic methods», ASTM E1961 – 16 Standard Practice for Mechanized Ultrasonic Examination of Girth Welds Using Zonal Discrimination with Focused Search Units). The survey procedure regulations are used as a basis to formulate the requirements for UUV structural design, instrumentation and motion parameters. Studies with the developed mathematical model of UUV equipped with additional wheel propulsors are used to suggest some original UUV control algorithms. Their feasibility has been confirmed through verification efforts (including simulations as well as UUV prototype tests in full scale conditions), which also identified areas of their further improvement. A robot vehicle of new type is suggested (presently one of a kind in Russia), covering a wider range of ship survey tasks without dry docking. Mathematical modelling of curvilinear motion as well as full-scale trials provide good reason

for application of UUVs with hybrid propulsion system. Areas for further improvement of the developed UUV control algorithms are identified.

Key words: UUV, in-water survey of ship hulls, hybrid propulsion system.

Author declares lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Gladkova O. Application of hybrid propulsion UUV for ship hull survey without dry docking. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; special issue 1: 213–223 (in Russian).

UDC 629.57+551.46 DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-213-223

Проблема обеспечения исправного технического состояния для морского и речного транспорта особенно остро стоит в последнее время. По данным Европейского Союза за 2006 г., ежегодно свыше 400 кораблей тонут, зачастую вследствие ослабления конструкций из-за коррозии, плохого качества сварки и плохого мониторинга их состояния [1]. Своевременное обнаружение отклонений параметров подводных частей корпусов судов от нормы позволяет предотвратить аварийные ситуации, которые могут привести к катастрофическим последствиям. Для этого в России предусмотрена специальная процедура освидетельствования судов, регламентированная Российским морским регистром судоходства (РМРС [2–4]) и требованиями Российского Речного Регистра [5].

Традиционно оценка состояния подводных частей судов осуществляется в сухом доке. При этом подготовительные операции (разгрузка корабля, перемещение его в сухой док, просушка, очистка поверхности металла, осушение резервуаров) наряду с основными являются продолжительными и трудоемкими. Необходимость в их проведении приводит к существенным экономическим затратам. К примеру, каждый день простоя большого нефтяного танкера в доке стоит приблизительно €50000 [1]. Другой вариант предусматривает осуществление дефектоскопии непосредственно в воде и допускается Правилами РМРС [2] при условии получения информации, полностью эквивалентной результатам освидетельствования в сухом доке. Выполнение таких работ водолазами с использованием инструментов для очистки поверхностей, подводной видеосистемы, приборов для замеров толщин и деформаций корпусных конструкций, аппаратуры неразрушающего контроля позволяет сократить временные и финансовые потери, связанные с простоем судна и арендой дока. Отметим тот факт, что данный вариант освидетельствования в соответствии с требованиями РМРС допускает проведение измерений не по всей поверхности, а лишь в нескольких точках. Статистические данные, представленные в [6], показывают, что при таком обследовании судна высока вероятность пропуска дефектов, что, в свою очередь, приводит к неправильной оценке риска возникновения аварий в ходе эксплуатации.

Возможность осуществления операций диагностирования без угрозы для здоровья и жизни человека, с большей эффективностью и сведением к минимуму зон, неподверженных детальному контролю, делает целесообразным переход на роботизированные технологии бездокового освидетельствования подводных частей корпусов судов, в частности с применением необитаемых подводных аппаратов (НПА). Исходные требования, предъявляемые к такому техническому средству, можно составить на основе правил освидетельствования судов в эксплуатации [2, 5]. В соответствии с ними должен быть проведен полный спектр работ по оценке износа корпусных конструкций, изменений первоначальной формы, технического состояния судовых устройств и определению нарушения целостности элементов корпуса (таблица).

В соответствии с данными таблицы, всю совокупность процедур можно условно разделить на две группы: к первой относятся работы по оценке технического состояния подводных судовых устройств, ко второй – операции по сплошному осмотру корпуса судна с целью выявления видимых или скрытых дефектов. Работы первой группы могут быть выполнены только в режиме телеуправления по командам оператора, возможности автоматизации при этом минимальны, а задачи проведения прецизионных метрологических измерений (например, на соответствие зазоров в подшипниках баллера руля нормам конструкторской документации) требуют применения не только средств визуального осмотра, но и других методов и инструментов. Диагностирование состояния корпуса судна на предмет выявления видимых или скрытых дефектов может выполняться как по площади всей поверхности об-

шивки корабля (полная дефектация), так и в отдельной области, указанной инспектором (частичная дефектация), и предполагает, что классический технический облик осмотрового НПА должен быть дополнен средствами неразрушающего контроля, механическими, гидроакустическими или оптическими измерителями деформаций, а также устройствами зачистки локальных корпусных элементов перед проведением дефектоскопии.

Операции по выявлению скрытых дефектов являются ключевыми в процессе освидетельствования. Работа с различными материалами корпусов судов (в том числе немагнитными) в условиях водной среды приводит к необходимости использования ультразвукового контроля (УЗК) как наиболее универсального метода. Поскольку зачастую корпусные конструкции судна имеют большое количество соединений, осуществляемых сваркой (например, крупное судно или гражданский лайнер содержит порядка 120 опасных швов и около 600000 м^2 листовой стали разной толщины [1]), необходимо обеспечение требований к ультразвуковому контролю листового проката и сварных соединений, которые регламентированы ГОСТ Р 55724-2013 [7] «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые». При их УЗК применяют способы поперечно-продольного (рис. 1*а*) или продольно-поперечного (рис. 1*б*) сканирования, которые фактически задают траекторию перемещения датчиков и, следовательно, аппарата-носителя. Шаги поперечного Δ_{ct} и продольного Δ_{cl} сканирования определяются физическими характеристиками используемых преобразователей и толщиной контролируемого сварного соединения, при этом они должны быть не более половины размера активного элемента в направлении шага: для случая поперечно-продольного сканирования данный шаг постоянен, для продольно-поперечного увеличивается по мере удаления от обследуемого сварного соединения, но первый шаг Δ_{ct} рассчитывается по аналогии с Δ_{cl}.

В стандарте американской международной организации ASTM E1961 – 16 Standard Practice for Mechanized Ultrasonic Examination of Girth Welds Using Zonal Discrimination with Focused Search Units [8] указаны необходимые точности измерений. Данные величины предназначены, в первую очередь, для ультразвукового контроля сварных швов труб, используемых при строительстве газо-

Стадии освидетельствования корпусных конструкций судна

Ship hull survey stages

Стадия	Измеряемый параметр	Требования
Износ корпусных конструкций	Толщина корпуса	– ≥ 3 точек на каждом листе обшивки или 1 замер на каждые 5 м^2; – точность измерений не менее 0,1 мм
	Глубина открытой коррозионной язвины	Точность измерений не менее 0,1 мм
Изменения первоначальной формы (величина отклонения поверхности элемента корпуса относительно исходной геометрии)	Стрелка прогиба на базе 300 мм	Точность измерений не менее 0,1 мм
	Максимальная стрелка прогиба	Точность измерений не менее 1 мм
	Размеры зоны деформаций в плане	Точность измерений не менее 100 мм
Нарушения целостности элементов корпуса (трещины и разрывы)	Величина раскрытия кромок трещины, ее длина и координаты	Точность измерений не менее 5 мм
	Ориентация	Измерение угла между линией, соединяющей начало и конец трещины, и диаметральной или основной плоскостью судна
Техническое состояние судовых устройств	Осмотр видимых частей судового рулевого устройства, главных движителей и подруливающих устройств, гидроакустического навигационного оборудования	
	Замеры зазоров в подшипниках баллера руля, дейдвудных подшипниках и т.п.	
	Дефектоскопия лопастей гребных винтов на предмет отсутствия трещин и других повреждений	

и нефтепроводов. Однако на них, как на одни из самых жестких требований, можно ориентироваться при разработке методики дефектации сварных соединений листов обшивки корпуса судна. Согласно данному нормативному документу, измеритель текущего положения средства УЗК относительно сварного шва должен обеспечивать определение расстояния (в том числе и по поверхности с отличной от нуля кривизной) с точностью не хуже 1 см, а система диагностирования – четко фиксировать расположение дефектов относительно начального положения сканирования с погрешностью не более 1 см. Требования к скоростям осуществления дефектоскопии в данных стандартах не приведены. Выбор данного параметра движения будет, прежде всего, относиться к возможностям носителя.

Таким образом, с учетом вышеперечисленных требований можно выделить следующие варианты организации движения НПА в процессе обследования корпуса судна на плаву:

- полная дефектация корпуса судна (рис. 2*а*) подразумевает движение аппарата горизонтальными или вертикальными галсами с захватом датчиками (системой датчиков) дефектоскопии или толщинометрии максимально возможной площади поверхности;
- частичная дефектация корпуса судна (рис. 2*б*) представляет собой детальное исследование определенных областей (существенно меньших размеров, чем в первом случае), указанных оператором-инспектором освидетельствования. В качестве таких площадок могут выступать сварные соединения, отдельные корпусные элементы, подвергаемые существенным нагрузкам, участки, для которых результаты диагностирования являются спорными и т.п. На основе данных [7, 8] параметры траекторий обследования – «микрогалсов» – могут составлять величины порядка 1 м по перемещению вдоль строительной оси аппарата, с шагом 0,15 м (например, при использовании массива из 6 преобразователей цилиндрической формы диаметром 0,05 м, расположенных в ряд) и точностью позиционирования до 0,01 м.

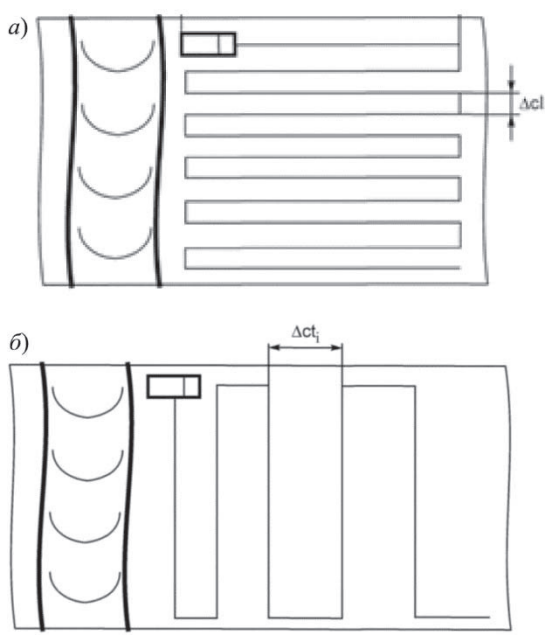

Рис. 1. Способы сканирования: *а*) поперечно-продольный; *б*) продольно-поперечный

Fig. 1. Scanning methods: *a)* transverse-longitudinal scanning; *b)* longitudinal-transverse scanning

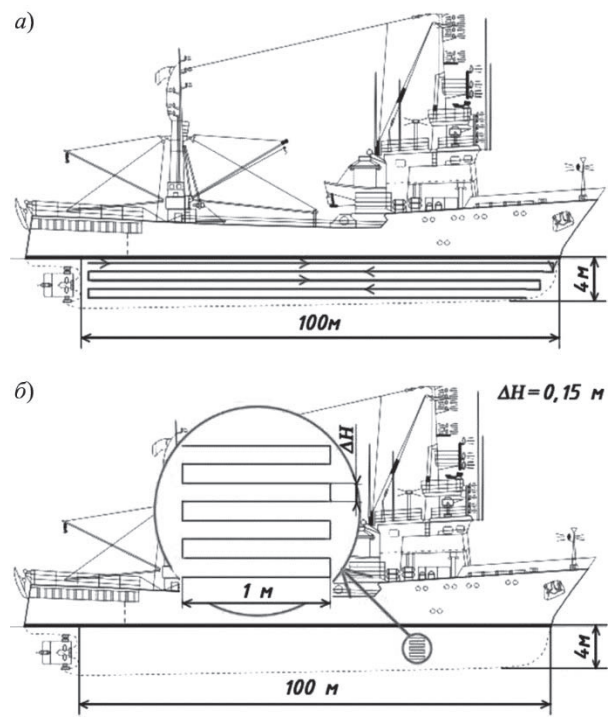

Рис. 2. Примеры вариантов организации движения НПА при освидетельствовании корпуса судна в режиме: *а*) полной дефектации; *б*) частичной дефектации

Fig. 2. Examples of UUV navigation patterns for ship hull survey tasks: *a*) full inspection; *b*) partial inspection

По результатам проведенного анализа сформулируем ряд обязательных критериев, которым должно отвечать техническое средство, предназначенное для бездокового освидетельствования частей корпусов судов:

- в состав аппарата кроме видеокамер должны входить измерители контролируемых параметров (толщин, размеров скрытых дефектов, трещин и разрывов, величин деформаций и т.д.);
- в состав аппарата должны входить устройства очистки поверхности от биологического обрастания, продуктов сплошной коррозии, отслоений краски и т.д.;
- режимы движения аппарата в процессе диагностики должны обеспечивать номинальные режимы работы измерительной аппаратуры (в качестве траекторий предлагается движение галсами с шагами, определяемыми параметрами используемых преобразователей);
- подводный робототехнический комплекс должен содержать средства навигационной привязки выявленных дефектов (расположение дефектов относительно выбранной системы координат с точностью не хуже 1 см).

Из вышеизложенного следует, что создание универсального НПА, способного провести весь комплекс нормативных проверок технического состояния корпусных конструкций судов на плаву, является довольно сложной задачей. Одним из вариантов ее решения может стать применение НПА модульных конструкций, которые представляют собой аппараты-носители с необходимым для конкретных операций оснащением: дополнительными манипуляторами (для осмотра рулевых устройств) и средствами неразрушающего контроля (для дефектоскопии корпуса судна).

На сегодняшний день создано достаточно много образцов необитаемых подводных аппаратов [9], разработчики которых позиционируют свои изделия как средства для инспекции (освидетельствования) корпусов судов, что не всегда справедливо. Например, аппараты, работающие в режиме плавания и имеющие в своем составе только движители на основе гребных винтов (рис. 3*а*, [10]), не имеют возможности проведения обследования объемными методами неразрушающего контроля (вихретоковыми или ультразвуковыми) за счет наличия существенного отстояния от поверхности (порядка метра). Это делает их применимыми лишь в тех операциях, где достаточно визуального осмотра. Полный спектр работ по освидетельствованию подводных частей корпуса судна, включающий задачу выявления скрытых дефектов, требует наличия гарантированного контакта или небольшого зазора (порядка нескольких миллиметров) между используемыми датчиками и поверхностью. Как показано в [11], возможным решением является применение в составе аппарата комбинированных средств движения – не только гребных винтов, но и контактных движителей, например, колесных или гусеничных (рис. 3*б*, [12]).

Вышеуказанные аппараты еще раз подтверждают актуальность задачи перехода на роботизированное освидетельствование подводных частей корпусов судов. Однако в научной литературе на текущий момент отсутствует аналитическое описание и обоснование целесообразности применения оригинальных конструктивных схем и алгоритмов работы технических средств с комбинированными средствами движения. В связи с этим исследование

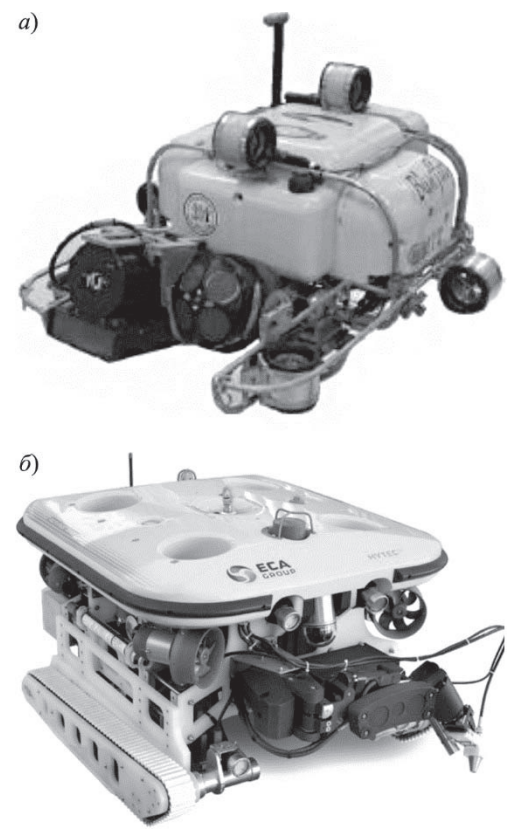

Рис. 3. НПА для инспекции корпусов судов на плаву: *а*) HAUV; *б*) Roving Bat

Fig. 3. UUV for in-water-survey of ship hulls: *a*) HAUV; *b*) Roving Bat

вопросов организации движения НПА с дополнительными колесными или гусеничными движителями в процессе дефектоскопии поверхности корпуса судна является принципиально новой задачей.

Выявление особенностей функционирования таких аппаратов, разработку и проверку алгоритмов системы управления движением в различных режимах до этапа натурных испытаний целесообразно производить методами имитационного моделирования. Рассмотрим математическую модель криволинейного движения в процессе обследования корпуса судна необитаемого подводного аппарата, в состав движительного комплекса которого входят колеса (рис. 4). В качестве базовой конструктивной схемы выбран аппарат с 4 вертикальными движителями на основе гребных винтов, за счет сил тяги $F_{\text{В}ij}$ которых обеспечивается прижим к обследуемой поверхности, и с 4 маршевыми движителями, расположенными под одинаковыми углами α к продольной оси аппарата, осуществляющими управление углом курса аппарата, маршевым и лаговым движениями в процессе плавания, развивающими силы тяги $F_{\text{М}ij}$. В отличие от традиционной конструкции НПА в схеме аппарата с комбинированными средствами дополнительно присутствует полноприводное шасси из 4 колес, создающих силы реакции с проекциями $R_{xij}, R_{yij}, R_{zij}$ на главные строительные оси аппарата.

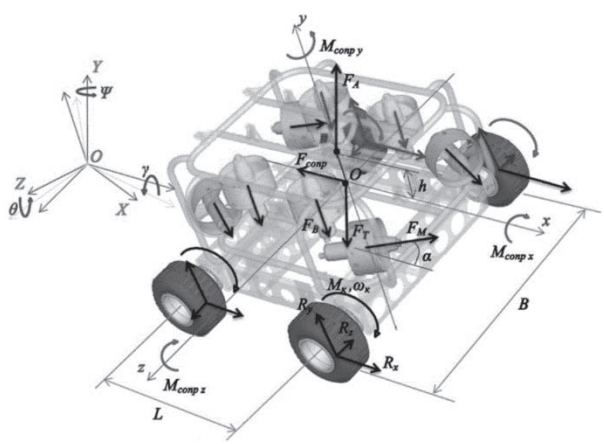

Рис. 4. Схема действия сил и моментов на НПА с комбинированными средствами движения в процессе дефектоскопии корпуса судна на плаву

Fig. 4. Diagram of forces and moments acting on hybrid UUV during in-water-survey missions

Здесь индекс $i = 1$ соответствует правому борту НПА, $i = 2$ – левому, $j = 1$ – осям движителей, расположенных в носу аппарата, $j = 2$ – расположенных в корме. Для удобства составления уравнений динамики движения аппарата используются следующие системы координат: $OXYZ$ – неподвижная система координат, оси которой в начальный момент времени совпадают со строительными осями аппарата при его нулевых углах курса Ψ, дифферента ϑ и крена γ, начало координат O расположено в центре масс НПА; $Oxyz$ – система координат, связанная с аппаратом; $Ox'y'z'$ – полусвязанная система координат, оси которой совпадают с осями аппарата в начальный момент и не изменяют углового положения в процессе движения. Построение проведем с учетом допущений о том, что аппарат массой m, моментами инерции J_x, J_y, J_z относительно осей Ox, Oy и Oz соответственно и присоединенными массами $\lambda_{11}, \lambda_{55}, \lambda_{16}$, имеет ось симметрии Oy, силы гидродинамического сопротивления $F_{\text{сопр}}$, приложены к центру масс, связь колес с корпусом аппарата в вертикальной плоскости в рамках данной модели рассматривается без учета упругих и демпфирующих свойств подвески, а кривизна опорной поверхности такова, что в каждый момент времени дифференциальная подвеска обеспечивает контакт всех 4 колес с обследуемой частью корпуса судна. В модели движения НПА учитывается действие моментов гидродинамического сопротивления $M_{\text{сопр}x}, M_{\text{сопр}y}, M_{\text{сопр}z}$, силы тяжести $F_{\text{т}}$, приложенной к центру масс, и гидростатической силы Архимеда $F_{\text{А}}$, приложенной к центру объема тела. Расстояние h между этими точками (метацентрическая высота) в общем случае отлично от нуля. Примем следующие обозначения: L, B – длина и ширина колесной базы; E, D – расстояния между маршевыми движителями вдоль продольной и поперечной осей аппарата; K, T – расстояния между вертикальными движителями вдоль продольной и поперечной осей аппарата соответственно; H, H_M – высоты центра масс аппарата относительно плоскости, проходящей через точки контакта каждого колеса с поверхностью, и относительно плоскости маршевых движителей соответственно.

В состав полной модели криволинейного движения НПА с движителями только на основе гребных винтов входят математические модели гребного винта и уравнения динамики криволинейного

движения аппарата по обследуемой опорной поверхности. Для случая НПА с комбинированными средствами движения они дополняются математическим описанием колесных движителей.

В рассматриваемом нами варианте все гребные винты при движении НПА по опорной поверхности работают только в режиме, близком к швартовному, без реверса. В связи с этим используется упрощенная математическая модель гребного винта.

В модели качения упругого деформируемого колеса с моментом инерции вокруг оси вращения $J_{\text{к}}$ и моментом инерции ротора двигателя $J_{\text{рот}}$ по гладкой недеформируемой абсолютно жесткой опорной поверхности с угловой скоростью $\omega_{\text{к}}$ и продольной скоростью V_x момент двигателя $M_{\text{дв}}$, подводимый к колесу, уравновешивается моментом от силы реакции движителя вдоль опорной поверхности $M\left(R_{x,z}\right)$, моментом сопротивления качению $M_f\left(R_y\right)$ и моментом гидродинамического сопротивления $M_{\text{гидр}}$ [13]. Для колесного движителя скорость вращения $\omega_{\text{к}}$ связана с частотой вращения выходного вала $\omega_{\text{дв}}$ через коэффициент редукции $i_{\text{р}}$ выражением $\omega_{\text{дв}} = i_{\text{р}}\omega_{\text{к}}$. Уравнение нагрузки двигателя колеса может быть представлено следующим образом:

$$M_{\text{дв}} = J_{\text{рот}}\dot{\omega}_{\text{дв}} + \\ +\left(1/i_{\text{р}}\right)\cdot\left[J_{\text{к}}\dot{\omega}_{\text{к}} + M_{\text{гидр}} + M_f\left(R_y\right) + M\left(R_{x,z}\right)\right].$$

Ключевой особенностью предложенной схемы организации движения является возможность управления моментом сопротивления качению и моментом от силы реакции движителя вдоль опорной поверхности за счет вертикальных гребных винтов с регулируемой силой тяги $F_{\text{В}} = R_y$:

$$M_f\left(R_y\right) = fR_y;$$
$$M\left(R_{x,z}\right) = \mu_s\left(S\right)\cdot R_y r_{\text{к}} = R_x B + R_z L, \qquad (1)$$

где коэффициент сопротивления качению f и динамический радиус колеса $r_{\text{к}}$ принимаются постоянными величинами, равными для всех колес аппарата. Коэффициент трения частичного скольжения μ_s зависит от величины скольжения S колес аппарата по опорной поверхности [14], которое, в свою очередь, определяется как

$$S = \frac{1}{\omega_{\text{к}} r_{\text{к}}}\cdot\sqrt{\left(V_x \pm \omega_y\frac{B}{2} - \omega_{\text{к}} r_{\text{к}}\right)^2 + \left(\omega_y\frac{L}{2}\right)^2}. \qquad (2)$$

Здесь V_x и ω_y – продольная у угловая скорости движения аппарата соответственно. Знак в выражении выбирается положительным для забегающего борта, отрицательным – для отстающего.

Полные уравнения динамики движения НПА с комбинированными средствами движения приведены в [13]. С учетом допущений о медленном изменении углов дифферента и крена аппарата, а также малых угловых скоростях ω_x, ω_z и ускорениях $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_z$ они могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{cases}
\left(m+\lambda_{11}\right)\dot{V}_x = \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}R_{xij} + \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}F_{\text{М}ij}\cos\left(\alpha\right) - \\
-F_{\text{сопр}x} + \left(F_{\text{А}} - F_{\text{т}}\right)\sin\left(\vartheta\right)\cos\left(\gamma\right); \\
\left(J_y + \lambda_{55}\right)\dot{\omega}_y = \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}R_{xij}\frac{B}{2} + \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}R_{zij}\frac{L}{2} + \\
+\sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}F_{Mij}\cos\left(\alpha\right)\frac{D}{2} + \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}F_{Mij}\sin\left(\alpha\right)\frac{E}{2} - \\
-M_{\text{сопру}}; \\
\sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}R_{yij} + \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}F_{\text{В}ij} + \left(F_{\text{А}} - F_{\text{т}}\right)\cos\left(\vartheta\right)\cos\left(\gamma\right) = 0; \\
-\left(m+\lambda_{11}\right)V_x\omega_y = \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}R_{zij} + \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}F_{\text{М}ij}\sin\left(\alpha\right) - \\
-\left(F_{\text{А}} - F_{\text{т}}\right)\sin\left(\gamma\right); \\
-\left(mh-\lambda_{16}\right)V_x\omega_y = \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}R_{yij}\frac{B}{2} + \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}R_{zij}H + \\
+\sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}F_{Mij}\sin(\alpha)H_M + \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}F_{Bij}\frac{T}{2} - F_{\text{А}}h\sin\left(\gamma\right); \\
-\left(mh-\lambda_{16}\right)\dot{V}_x = \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}R_{xij}H + \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}R_{yij}\frac{L}{2} + \\
+\sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}F_{Mij}\cos\left(\alpha\right)H_M + \sum\limits_{i=1}^{2}\sum\limits_{j=1}^{2}F_{Bij}\frac{K}{2} - \\
-F_{\text{А}}h\sin\left(\vartheta\right)\cos\left(\gamma\right).
\end{cases} \qquad (3)$$

По результатам моделирования системы (3) можно выделить существенную особенность, присущую НПА с комбинированными средствами движения. В отличие от управления перемещением аппарата с движительным комплексом на основе

гребных винтов, использование колесных движителей совместно с возможностью управления вертикальной силой прижима приводит к увеличению курсовой устойчивости объекта. Это свойство означает, что даже при отсутствии замыкания в контуре управления курсовым углом действие возмущающего момента $M_{\text{возм}}$ может быть скомпенсировано за счет возникновения, в соответствии с (1), реакции R_z в пятне контакта колеса с опорной поверхностью и, следовательно, момента сопротивления повороту $M_{\text{сопр}}$. Аналогичные результаты были получены для всех четырех колес аппарата. Зависимость отношения величины стабилизирующего момента сопротивления повороту к возмущающему моменту от величины скольжений колес $M_{\text{сопр}}/M_{\text{возм}} = f(S)$ имеет качественный вид, приведенный на рис. 5.

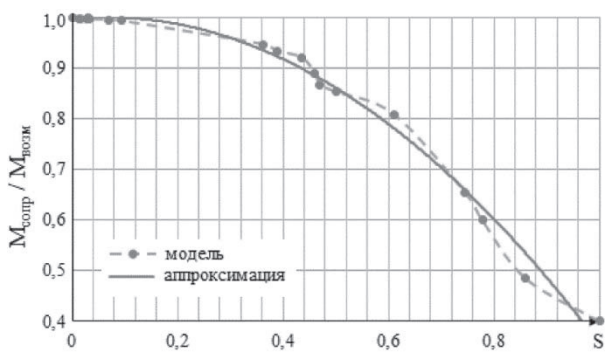

Рис. 5. Зависимость отношения момента сопротивления к моменту внешнего возмущения от скольжения (на примере колес левого борта)

Fig. 5. Drag moment/excitation moment ratio versus sliding (illustrated for portside wheels)

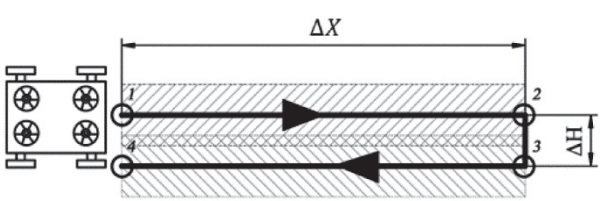

Рис. 6. Траектория движения НПА в процессе дефектоскопии корпуса судна на плаву (на примере одного галса)

Fig. 6. UUV trajectory during inspection of ship hull in water (illustrated for one track)

Регулируемая сила прижима, и, соответственно, управляемая вертикальная реакция на каждом из колесных движителей позволяют компенсировать возмущающие моменты разных величин. При этом необходимым условием является осуществление движения аппарата с наименьшим скольжением колесных движителей или без него. В соответствии с рис. 5 при скольжении менее 20 % удается достигнуть практически полной компенсации внешнего возмущающего момента. Поскольку скольжение S при прямолинейном движении $\omega_y = 0$ в соответствии с (2) определяется только продольной скоростью движения аппарата V_x и скоростью вращения колеса $\omega_к$, величины которых могут быть получены информационно-измерительным комплексом аппарата, в разрабатываемой системе управления для режима прямолинейного движения НПА предлагается предусмотреть регулятор величины скольжения, обеспечивающий движение без проскальзывания каждого из колес.

Как было указано выше, типичными траекториями движения аппарата в процессе освидетельствования являются галсы. На рис. 6 приведена схема движения аппарата на примере одного галса длиной ΔX с шагом ΔH.

Длина галса ΔX зависит от режима осмотра. Она составляет несколько десятков (или сотен) метров при обеспечении полной дефектации корпуса судна и порядка метра при частичной дефектации. Шаг определяется параметрами датчиков дефектоскопии. На участке *1–2* аппарат должен осуществлять прямолинейное движение в полусвязанной системе координат $Ox'y'z'$ с поддержанием курсового угла $\varphi = 0°$, в окрестности точки *2* – совершить поворот на угол $\varphi = 90°$ и продолжить прямолинейное движение на участке *2–3* с заданным курсом (аналогичные действия выполняются в окрестности точки *3* и на участке *3–4*). При этом независимо от режима осмотра корпуса корабля (галсами или «микрогалсами») точности позиционирования и координатной привязки полученных измерений должны быть не хуже 0,01 м. Такие высокие требования к измерениям продольных перемещений в режиме сплошного осмотра влияют как на выбор датчикового оснащения аппарата, так и на организацию движения НПА с точки зрения построения алгоритмов системы управления. В предположении о том, что выбранные измерители линейных перемещений и угловых координат гарантированно обеспечивают работу в зоне допустимых

погрешностей, наличие такого внутреннего свойства системы, как стабилизация заданного курсового угла при прямолинейном движении аппарата без скольжения, позволяет получить существенно лучшие характеристики, чем при аналогичном движении аппарата с традиционным движительным комплексом на основе гребных винтов.

В качестве объекта для исследования методами имитационного моделирования использовался НПА «Износ» [15, 16], разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана при непосредственном участии автора статьи. Состав информационно-измерительного комплекса данного аппарата подробно описан в [17]. В ходе натурных испытаний были проверены алгоритмы отработки автоматических подрежимов выхода аппарата в заданную точку и следования траектории. Результаты реализации программного режима работы движения аппарата галсами с $\Delta X = 4$ м и $\Delta H = 0{,}15$ м приведены на рис. 7. Как видно из полученных графиков, траекторное движение на прямолинейных участках за счет колесных движителей, перемещающихся без проскальзываний, осуществлялось с минимальной погрешностью, определяемой лишь возможностями информационно-измерительного комплекса (наименьшая погрешность при прямолинейном движении на отрезке в 4 м составила 0,05 м).

Существенные отличия текущей траектории от заданной в областях поворота аппарата обусловлены неточностью определения координат мгновенного центра вращения и проскальзываниями одометров при повороте, что было выявлено в ходе испытаний. В рамках математического моделирования подобные результаты для поворотного движения получены не были, поскольку в моделях измерителей параметров линейных и угловых координат аппарата использовались существенные упрощения. Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали необходимость доработки и корректировки алгоритмов определения пути, пройденного аппаратом в процессе изменения курсового угла. Решение этой задачи с соответствующим усложнением математической модели криволинейного движения будет продолжено.

Рис. 7. Траектория движения НПА в процессе дефектоскопии корпуса судна на плаву

Fig. 7. UUV trajectory during inspection of ship hull in water

Проведенный анализ требований к освидетельствованию подводных корпусных частей судов позволяет сделать вывод о том, что осуществление перехода на роботизированные технологии в таких операциях является актуальной, но весьма нетривиальной задачей. Предложенный вариант использования в качестве технического средства для диагностирования состояний подводных конструкций необитаемого аппарата с комбинированными средствами движения был исследован в рамках данной работы. На основе составленной математической модели движения НПА по корпусу судна и по экспериментальным данным натурных испытаний опытного образца аппарата были предложены оригинальные алгоритмы системы управления криволинейным движением и подтверждена возможность использования такой технологии диагностирования подводных частей корпусов судов.

Библиографический список

References

1. *Троицкий В.А.* Совершенствование мониторинга технического состояния морских судов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2009. № 4. С. 26–29. [*V. Troitskiy*. Improvement of technical status monitoring for sea-going vessels. 2009; 4: 26–2. (In Russian)].
2. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации: НД № 2-020101-012. Российский морской регистр судоходства, 2017. С. 491. [Rules for the Classification Surveys of Ships in Service:ND No.2-020101-012. Russian Maritime Register of Shipping. 2017; P. 491].
3. Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации: НД № 2-030101-009. Российский морской регистр судоходства, 2016. С. 268. [Guidelines on Technical Supervision of Ships in Service, ND No. 2-030101-009. Russian Maritime Register of Shipping. 2016. P. 268].
4. Приложения к руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации: НД № 2-030101-009. Российский морской регистр судоходства, 2017.

С. 300. [Appendices to Guidelines on Technical Supervision of Ships in Service: ND No. 2-030101-009. Russian Maritime Register of Shipping].

5. Правила освидетельствования судов в процессе их эксплуатации (ПОСЭ). Российский речной регистр, 2017. С. 152. [Rules for the Classification Surveys of Ships in Service. Russian River Register of Shipping. 2017; P. 152].
6. *Егоров А.Г.* Оценка риска эксплуатации корпусов барже-буксирных составов внутреннего и смешанного река-море плавания // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. № 3(381). С. 139–148. [*A. Egorov.* Risk assessment for operation of barge-tug trains intended for inland and river-sea operation. Transactions of Krylov State Research Centre. 2017; 3(381): 139–48. (In Russian)].
7. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М., 2015. С. 27. [GOST P 55724-2013. Non-destructive testing. Welded joints. Ultrasonic methods].
8. ASTM E1961 – 16. Standard Practice for Mechanized Ultrasonic Examination of Girth Welds Using Zonal Discrimination with Focused Search Units: American Society for Testing and Materials, 1998.
9. *Быканова А.Ю. и др.* Роботизированный комплекс подводного инспектирования и лазерной чистки судов на плаву // Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток: ИПМТ, 2017. С. 122–128. [*A. Bykanova et al.* Robotic system for underwater inspection and laser cleaning of ships in water. Proceedings of the VII All-Russion Scientific & Technical Conference «Technical Challenges in Development of World Ocean Resources». Vladivostok: IPMT, 2017; P.122–8. (in Russian)].
10. *Vaganay J. и др.* Ship Hull Inspection by Hull-Relative Navigation and Control // CEANS 2005 MTS/IEEE. 2005: 1–6.
11. *Вельтищев В.В. и др.* Роботизированная технология освидетельствования подводной части судна // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 1(21). С. 15–24. [*V. Veltishchev et al.* Robotic technologies for survey of underwater ship hull. Underwater studies and robotics. 2016; 1(21): 15–24. (In Russian)].
12. Roving Bat: Hybrid ROV for inspection and cleaning [electronic resources] / website of Ashtead Technology. URL: http://www.ashtead-technology.com/rental-equipment/eca-hytec-roving-bat/ (access date: 24.02.2018).
13. *Гладкова О.И., Вельтищев В.В., Машков К.Ю.* Математическая модель криволинейного движения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с гибридным движительным комплексом // Труды НАМИ. 2017. Т. 3, № 270. С. 82–90. [*O. Gladkova, V. Veltishchev, K. Mashkov.* Mathematical model of curvilinear motions for hydbrid-propulsion ROV. Transactions NAMI. 2017; 3(270): 82–90. (In Russian)].
14. *Рождественский Ю.Л., Машков К.Ю.* О формировании реакций при качении упругого колеса по недеформируемому основанию в режимах бортового поворота // Труды МВТУ. 1982. № 390. С. 56–64. [*Y. Rozhdestvenskiy, K. Mashkov*. On generation of reactions at rolling of an elastic wheel over non-deformed base at side steering. Transactions MVTU. 1982; 390: 56–64. (In Russian)].
15. *Егоров С.А.* [и др.]; заявитель и патентообладатель МГТУ им. Н.Э. Баумана. Телеуправляемый подводный аппарат с колесным шасси для освидетельствования состояния корпусных конструкций судов: пат. RU163732U1 Рос. Федерация. № 2015149488/11; заявл. 18.11.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22. [*S. Egorov* [et al.] Applicant and patent owner BMSTU. Remote control underwater vehicle with wheeled chassis for survey of ship hull structures: patent RU163732U1 Russina Federation No. 2015149488/11; application date 18.11.2015; published on 10.08.2015. bul. No.22. (In Russian)].
16. *Григорьев М.В.* [и др.]. Создание системы мониторинга технического состояния судов, в том числе ледового плавания и ледоколов, с использованием специальных технических средств освидетельствования подводной части корпуса и высокопроизводительных компьютерных технологий инженерного анализа. Отчет о НИР (заключ.). Инв. № 03.01.01.08-04/13. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. [*M. Grigoriev* [et al.] Development of a technical status monitoring system for ships, including special-purpose technical facilities for underwater hull inspection and high-performance computer technologies of engineering analysis. Research project report (final) Ref.No.03.01.01.08-04/13. M.: BMSTU, 2104. (In Russian)].
17. *Гамазов Н.И.* и др. Особенности построения и экспериментальная отработка информационно-управляющей системы гибридного телеуправляемого подводного аппарата // Технические проблемы освоения мирового океана. 2016. Т. 6. С. 401–405. [*N. Gamazov* et al. Specific structure and experimental verification of computerized control system for ROV. Technical Challenges in Development of World Ocean Resources. 2016; 6: 401–5. (In Russian)].

Сведения об авторах

Гладкова Ольга Игоревна, аспирантка МГТУ им. Баумана, младший научный сотрудник НИИСМ МГТУ им. Баумана, отдел «Подводные системы». Адрес: Москва, 105005, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, стр. 1. Тел.: +7 (985) 191-28-27; E-mail: gladkova_olya@mail.ru.

About the authors

Gladkova O., post-graduate student of Bauman Moscow State Technical University, junior research scientist of BMSTU Research Institute «Special Engineering», Underwater systems Department. Address: Ul. 2-aya Baumanovskaya 5, str.1, Moscow 105005, Russia. Tel.: +7 (985) 191-28-27; E-mail: gladkova_olya@mail.ru.

Поступила / Received: 02.03.18
Принята в печать / Accepted: 18.04.18
© Гладкова О.И., 2018