ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ И ДИНАМИКИ ПРИВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА С БУКСИРУЕМЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ МОДУЛЕМ РАДИОСВЯЗИ

В.В. Костенко, И.Г. Мокеева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Использование буксируемого поверхностного модуля радиосвязи (ПМР) позволяет организовать высокоскоростной канал связи поста управления с автономным подводным роботом (АПР), а также значительно упростить его навигационное обеспечение. При этом возмущения от кабеля связи, действующие на АПР и ПМР, будут в значительной степени влиять на характеристики движения такой привязной системы. В работе методами компьютерного моделирования исследуются силовые воздействия кабеля связи на буксировку, а также их влияние на движение аппарата в установившихся режимах и по типовым траекториям маневрирования. Для установившихся значений глубины погружения и скорости хода АПР определена длина кабеля связи, обеспечивающая минимальное силовое воздействие от буксировки на аппарат. Предложена комплексная модель системы управления движением подводной привязной системы, учитывающая динамику АПР и кабеля связи. Разработана кинематическая модель поведения ПМР, определяющая его заглубление и гидродинамическое сопротивление при буксировке. Приведены результаты моделирования движения привязной системы по типовым траекториям, характерным для обзорно-поисковых АПР, которые позволяют оценить дополнительные требования к тяговым характеристикам движительно-рулевого комплекса аппарата, а также к необходимому запасу плавучести ПМР.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличить эффективность выполнения работ АПР можно, обеспечив высокоскоростную связь с постом оператора в режиме реального времени. При этом появляется возможность оперативного получения больших объемов информации, накопленных в результате работы поискового оборудования аппарата. Наличие поверхностного модуля ретранслятора решает эту задачу, а также позволяет по данным его приемника спутниковой навигационной системы (СНС) уточнять географические координаты АПР [1–6].

Данное техническое решение, схематически изображенное на рис. 1, позволяет: учесть силы гидродинамического сопротивления и остаточной плавучести, действующей на корневой конец кабеля,

проводить подводно-технические работы в районах, не оборудованных гидроакустической навигационной системой, а накопленные бортовой навигационной системой аппарата ошибки определения координат периодически корректировать с помощью системы GPS/ГЛОНАСС поплавка. При этом очевидны значительные возмущающие воздействия на аппарат от кабеля связи с ПМР, влияющие на его маневренность и точность движения по заданной траектории. Целью проведенных исследований являлась оценка параметров движения АНПА и возмущений, возникающих от буксировки ПМР. Для достижения поставленной цели необходимо:

- зафиксировать на заданной глубине погружения относительно ПМР;

¹ 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: +7 (423) 243-24-16.
E-mail: kostenko@marine.febras.ru

Рис. 1. Схема разворачивания АПР с буксируемым на поверхности поплавковым модулем радиосвязи

- оценить для заданной скорости набегающего потока горизонтальное смещение ПМР, силы реакции кабеля заданной длины в местах крепления к ПМР и АПР.

■ Обоснование выбора длины кабеля связи

Наличие буксируемого оборудования является причиной дополнительных силовых возмущений, величина которых зависит от длины кабеля связи, скорости движения и заглубления аппарата. Критерием выбора длины кабеля является минимум возмущений, действующих на аппарат при буксировке ПМР.

Для расчета этих возмущений была использована прикладная программа ZONA, реализующая решение уравнения гибкой нерастяжимой нити в установившемся потоке [7–9]. При этом реакция кабеля на ПМР и аппарат определялась с учетом отмеченных выше требований. Моделирование проводилось по расчетной схеме, показанной на рис. 2, где приняты следующие обозначения: $X_n Y_n O_n$ – инерциальная система координат (ИСК); XYO_a – связанная система координат (ССК) АПР с центром в точке крепления корневого конца буксировочного кабеля; $X'Y'O_n$ – связанная система координат ПМР с центром в точке крепления ходового конца буксировочного кабеля; $F_{кху}$, $F_{ку}$, $F_{кх}$ – результирующая, вертикальная и горизонтальная реакции кабеля связи на АПР соответственно; $R_{пх}$ – горизонтальное силовое воздействие ПМ на кабель; Q_n – запас плавучести ПМР на компенсацию вертикальной реакции кабеля; L – длина кабеля связи; H_a , X_n – глубина хода АПР и горизонтальный снос ПМР соответственно. При этом максимальное гидродинамическое сопротивление полностью погруженного в воду ПМР $R_{пх}$ определяется соотношением:

$$R_{пх} = 0,5 \cdot C_{хп} \cdot \rho \cdot V_c^2 \cdot U_n^{2/3}, \quad (1)$$

где $C_{хп}$ – коэффициент гидродинамического сопротивления ПМР; ρ – плотность воды, U_n – водоизмещение полностью погруженного ПМР, обеспечивающее его максимальную дополнительную плавучесть Q_n ; V_c – установившаяся скорость хода АПР.

Рис. 2. Расчетная схема привязной системы «АПР – кабель – ПМР»

Рис. 3. Результаты расчета реакции кабеля для скорости хода АПР 1 м/с на глубине 10 м: а – $L = 15$ м; б – $L = 37,3$ м; в – $L = 50$ м.

Вычислительный алгоритм программы ZONA обеспечивает итерационный поиск натяжения корневого (со стороны аппарата) и ходового (со стороны ПМР) концов кабеля связи для заданных значений скорости набегающего потока, соответствующей скорости хода аппарата при буксировке [7]. Для расчета были приняты исходные данные, соответствующие параметрам разрабатываемого в ИПМТ ПМР и кабеля связи UPC-5051E-SO-OUT: $C_{xn} = 0,247$, $U_n = 0,0185$ м³, диаметр кабеля $D = 6,3$ мм, погонная плавучесть кабеля $q = -0,0023$ кг/м.

Анализ результатов моделирования буксировки ПМР со скоростью хода АПР $V_c = 1$ м/с на глубине $H_a = 10$ м показал, что при длине кабеля $L = 37,3$ м (см. рис. 3, б) вертикальная составляющая возмущения от буксировки F_{ky} отсутствует, а горизонтальная составляющая реакции кабеля F_{kx} минимальна.

В ходе моделирования движения привязной системы для каждого значения скорости буксировки из диапазона $V_c = 0,05 \div 1,00$ м/с было найдено значение оптимальной длины кабеля связи для глубины погружения аппарата $H_a = 10$ м. При этом длина кабеля

определялась в ходе итерационного поиска по условию нулевого значения вертикальной составляющей реакции, как показано на рис. 4.

Выявленная зависимость оптимальной длины кабеля, отнесенной к глубине погружения АНПА, от скорости буксировки показана на рис. 5.

■ Модель системы управления движением подводной привязной системы

Для моделирования системы управления движением (СУД) привязной системы была принята структура, приведенная на рис. 6.

На рис. 6 приняты следующие обозначения: λ – вектор присоединенных масс и моментов инерции АПР, m_a , Q_a , M_o – масса аппарата, остаточная плавучесть аппарата и момент остойчивости соответственно; H_z , V_{xz} , φ_z , ψ_z – заданные значения глубины погружения, скорости хода, заданного курса и дифферента АПР, соответственно; $\mathbf{u} = [u_x, u_y, u_\varphi, u_\psi]^T$ – вектор управления регуляторов движения;

Рис. 4. Зависимость вертикальной реакции кабеля от его длины и скорости хода АПР

Рис. 5. Зависимость оптимального запаса длины кабеля связи от скорости хода АНПА

Рис. 6. Структурная схема модели СУД подводной привязной системы

$F_{дрк} = [F_{dx}, F_{dy}, M_{dy}, M_{dz}]^T$ – вектор управляющих воздействий ДРК; $F_{сда} = [R_{ax}, R_{ay}, R_{az}, M_{ay}, M_{az}]^T$ – вектор гидродинамических сил и моментов аппарата; R_{nx} – гидродинамическое сопротивление ПМР; Q_n – максимальная остаточная плавучесть полностью погруженного ПМР; $F_k = [F_{kx}, F_{ky}, F_{kz}]^T$ – вектор возмущений кабеля связи на аппарат; $v_a = [v_{ax}, v_{ay}, v_{az}]$ – вектор линейных скоростей аппарата в ССК; $\omega_a = [\omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{az}]$ – вектор угловых скоростей аппарата в ССК.

Метод расчета реакции на концах кабельной связи основан на решении нелинейных дифференциальных уравнений динамики гибкой нити с частными производными по независимым переменным – дуговой координате и времени [11, 12]. При этом дифференциальные уравнения движения нити интегрируются с учетом начальных и граничных условий. Силловые воздействия ПМР, обусловленные его остаточной плавучестью Q_n и гидродинамическим сопротивлением R_{nx} , являются для уравнения гибкой связи граничными условиями на верхнем ходовом конце. Граничными условиями на нижнем (коренном) конце являются условия связи кабеля с буксирующим АПР. Начальные условия должны предусматривать конфигурацию нити и скорости ее точек в начальный момент времени и могут быть получены в результате предварительного расчета статики кабельной линии в стационарном потоке, обусловленном скоростью

течения и абсолютной начальной скоростью движения АПР и ПМР. Одним из подходов к построению математической модели динамики кабеля является его представление в виде дискретной модели, которой является система сосредоточенных масс, соединенных пружинами. Использование дискретных моделей позволяет получить уравнения динамики в форме системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Данный подход является наиболее популярным при решении задач динамики привязных систем с определением реакций кабеля F_{kx} , F_{ky} и F_{kz} , поскольку динамика аппарата также описывается системой ОДУ [11, 12].

В качестве прототипа АПР – буксировщика ПМР был принят гибридный АНПА «Чилим» разработки ИПМТ ДВО РАН [13], внешний вид которого приведен на рис. 7.

Принятая к моделированию привязной системы упрощенная динамика ДРК АНПА «Чилим» соответствует уравнениям [13]:

$$F_{dx} = \begin{cases} T_\partial \cdot \dot{F}_{dx} + F_{dx} = F_x^c, \\ F_x^c = K_{dx} \cdot u_x, |F_x^c| \leq F_x^{max}, \\ F_x^c = F_x^{max} \cdot \text{sign}(u_x), |F_x^c| > F_x^{max}; \end{cases}$$

$$F_{dy} = \begin{cases} T_\partial \cdot \dot{F}_{dy} + F_{dy} = F_y^c, \\ F_y^c = K_{dy} \cdot u_y, |F_y^c| \leq F_y^{max}, \\ F_y^c = F_y^{max} \cdot \text{sign}(u_y), |F_y^c| > F_y^{max}; \end{cases}$$

Рис. 7. Состав комплекса ТНПА «Чилим»: 1 – видеокамера, 2 – светильник, 3 – гидролокатор секторного обзора Imagenex 881L, 4 – отсек дополнительного оборудования, 5 – маршевый движитель, 6 – под-
руливающий движитель, 7 – отсек автопилота, 8 – джойстик управления, 9 – пульт управления ТНПА,
10 – компьютер оператора ТНПА, 11 – вьюшка оптокабельная с оптоколлектором

$$M_{\partial y} = \begin{cases} T_{\partial} \cdot \dot{M}_{\partial y} + M_{\partial y} = M_y^c, \\ M_y^c = K_{\partial \varphi} \cdot u_{\varphi}, |M_y^c| \leq M_y^{\max}, \\ M_y^c = M_y^{\max} \cdot \text{sign}(u_{\varphi}), |M_y^c| > M_y^{\max}; \end{cases} \quad (2)$$

$$M_{\partial z} = \begin{cases} T_{\partial} \cdot \dot{M}_{\partial z} + M_{\partial z} = M_z^c, \\ M_z^c = K_{\partial \psi} \cdot u_{\psi}, |M_z^c| \leq M_z^{\max}, \\ M_z^c = M_z^{\max} \cdot \text{sign}(u_{\psi}), |M_z^c| > M_z^{\max}, \end{cases}$$

где $i = x, y$ – индекс канала управления движением центра масс аппарата; $j = \varphi, \psi$ – индекс канала управления угловым движением аппарата; $T_{\partial} = 0,1$ с – постоянная времени движителей ДРК; $F_x^{\max} = 54$ Н, $F_y^{\max} = 58$ Н, $M_y^{\max} = 9,2$ Н·м, $M_z^{\max} = 7,3$ Н·м – ограничения управляющих воздействий ТНПА «Чилим»; $K_{\partial x} = \frac{F_x^{\max}}{N_{\max}}, K_{\partial y} = \frac{F_y^{\max}}{N_{\max}}, K_{\partial \varphi} = \frac{M_y^{\max}}{N_{\max}}, K_{\partial \psi} = \frac{M_z^{\max}}{N_{\max}}$ – коэффициенты передачи ДРК; $N_{\max} = 127$ – максимальное значение кодов управления регуляторов движения u_i ; $u_x = \kappa_{nx}(v_{x3} - v_x) + \kappa_{ux} \int (v_{x3} - v_x) -$ регулятор продольного хода, $u_y = \kappa_{ny}(H_3 - H_a) + \kappa_{\partial y} \dot{H}_a -$ регулятор глубины, $u_{\varphi} = \kappa_{n\varphi}(\varphi_3 - \varphi) + \kappa_{\partial \varphi} \omega_y -$ регулятор курса, $u_{\psi} = \kappa_{n\psi}(\psi_3 - \psi) + \kappa_{\partial \psi} \omega_z -$ регулятор дифферента.

Для описания динамики движения АПР в связанной системе координат была использована следующая упрощенная модель, учитывающая доминирующие силы и моменты:

$$\begin{cases} \dot{v}_{ax} \cdot (m_a + \lambda_{11}) = F_{\partial x} - R_{ax} - F_{\kappa x} - Q_a \cdot \sin \psi, \\ \dot{v}_{ay} \cdot (m_a + \lambda_{22}) = F_{\partial y} - R_{ay} + F_{\kappa y} - Q_a \cdot \cos \psi \cdot \cos \theta, \\ \dot{v}_{az} \cdot (m_a + \lambda_{33}) = -R_{az} - F_{\kappa z} + Q_a \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta, \\ \dot{\omega}_{ax} \cdot (J_x + \lambda_{44}) = -M_{ax} - M_o \cdot \cos \psi \cdot \cos \theta, \\ \dot{\omega}_{ay} \cdot (J_y + \lambda_{55}) = M_{\partial \varphi} - M_{ay}, \\ \dot{\omega}_{az} \cdot (J_z + \lambda_{66}) = M_{\partial \psi} - M_{az} - M_o \cdot \sin \psi \cdot \cos \theta, \\ \dot{x} = v_{ax}, \dot{y} = v_{ay}, \dot{z} = v_{az}, \\ \dot{\theta} = \omega_x - \tan \psi (\omega_y \cos \theta - \omega_z \sin \theta), \\ \dot{\varphi} = \sec \psi (\omega_y \cos \theta - \omega_z \sin \theta), \\ \dot{\psi} = \omega_y \cos \theta - \omega_z \sin \theta, \end{cases} \quad (3)$$

где $m_a = 30$ кг – масса аппарата; $\lambda_{11} = 0,5$ кг, $\lambda_{22} = 35$ кг, $\lambda_{33} = 27$ кг – присоединенные массы; $J_x = 0,2$ Н·м·с², $J_y = 6,6$ Н·м·с², $J_z = 6,2$ Н·м·с² – осевые моменты инерции; $\lambda_{44} = 5$ Н·м·с², $\lambda_{55} = 30,9$ Н·м·с², $\lambda_{66} = 28,5$ Н·м·с² – присоединенные моменты инерции; $Q_a = +5$ Н – остаточная плавучесть аппарата, $M_o = 15$ Н·м – момент остойчивости аппарата. Гидродинамические позиционные силы R_{ax}, R_{ay}, R_{az} и моменты M_{ax}, M_{ay}, M_{az} определялись на основании результатов предварительно проведенной «виртуальной» продувки 3D модели аппарата [13].

В соответствии с функциональным назначением был определен конструктивный облик ПМР, представленный на рис. 8.

Гидродинамическое сопротивление и плавучесть ПМР будут зависеть от того, какая его часть находится под водой, а какая – на поверхности. Пусть H_{Π} – глубина погружения точки O_{wl} (находится на ватерли-

нии ПМР при отсутствии вертикального возмущения от кабеля), а Δh_n – запас осадки устройства, которому соответствует запас плавучести Q_n на компенсацию вертикальной реакции кабеля. Рис. 9 иллюстрирует силы, действующие на ПМР в процессе буксировки с установившейся скоростью для граничных значений вертикальной реакции кабеля.

На рис. 9 приняты следующие обозначения: O_M – центр масс ПМР; O_{v1} – центр водоизмещения

Рис. 8. Конструктивный облик ПМР: а – прототип – поплавок-ре-
транслятор “Radio BOA”, б – ПМР разработки ИПМТ

Рис. 9. Силы, действующие на ПМР в процессе буксировки (слева
исходное положение ПМР при $F_{укп} = 0$ Н, справа положение ПМР
при $F_{укп} = Q_n$)

ПМР при минимальной осадке ($F_{укп} = 0$ Н); O_{v2} – центр водоизмещения ПМР при максимальной осадке ($F_{укп} = Q_n$); O_{w1} – уровень ватерлинии ПМР при $F_{укп} = 0$ Н; O_{w2} – уровень ватерлинии ПМР при $F_{укп} = Q_n$.

Примем допущение о линейной зависимости гидродинамического сопротивления ПМР от его заглубления H_n . Тогда фактическое сопротивление модуля R_{nx}^ϕ можно вычислить по соотношению:

$$\begin{cases} R_{nx}^\phi = R_{nx} \frac{\Delta h_n + H_n}{2 \cdot h_n}, & \text{при } 0 \leq H_n < \Delta h_n, \\ R_{nx}^\phi = R_{nx}, & \text{при } H_n \geq \Delta h_n, \end{cases} \quad (4)$$

где R_{nx} – максимальное значение гидродинамического сопротивления ПМР по формуле (1) при условии $H_n = \Delta h_n$. Приняв очевидное допущение о линейной зависимости дополнительной плавучести ПМР от его заглубления, получим:

$$\begin{cases} Q_n^\phi = Q_n \frac{H_n}{\Delta h_n}, & \text{при } 0 \leq H_n < \Delta h_n, \\ Q_n^\phi = Q_n, & \text{при } H_n \geq \Delta h_n, \end{cases} \quad (5)$$

где $Q_n = 50$ Н, $\Delta h_n = 0,4$ м – запас плавучести и осадки ПМР для компенсации вертикальной реакции кабеля соответственно.

В свою очередь, глубина погружения ПМР будет зависеть от вертикальной реакции $F_{укп}$, значение которой предварительно определяется в соответствии с динамической моделью кабеля [12]. С учетом выполнения требования достаточности запаса плавучести ПМР $F_{укп} \leq Q_n$ можно записать:

$$H_n = \Delta h_n \frac{F_{укп}}{Q_n}. \quad (6)$$

■ Моделирование движения подводной привязной системы

В ходе моделирования траекторного маневрирования привязной системы были определены параметры движения АПР и ПМР, а также силовые реакции на концах кабеля связи при типовых режимах маневрирования, характерных для обзорно-поискового аппарата. На начальном этапе моделирования маневра в продольно-вертикальной плоскости привязная система находится на поверхности с удалением ПМР от АНПА на длину кабеля связи 20 м. Далее АНПА отрабатывает разгон до скорости хода 1 м/с, двигаясь по поверхности, после чего задается заглубление до

10 м, а через 60 с задается всплытие до глубины 5 м. Результаты моделирования этого режима движения иллюстрирует рис. 10.

На начальном этапе моделирования маневра в горизонтальной плоскости по траектории «меандр» привязная система также находится на поверхности с удалением ПМР от АНПА на длину кабеля связи 20 м. Далее АНПА отрабатывал разгон до скорости 1 м/с с заданным курсом 0 град., двигаясь по поверх-

ности, после которого задается глубина погружения 10 м. После отработки заданной глубины АНПА движется 50 м на заданном курсе 0 град, по прохождении заданной дистанции задается курс 90 град, после отработки которого аппарат движется 50 м. Далее курс меняется на 180 град и после завершения переходного процесса АНПА движется еще 50 м. Полученные результаты моделирования иллюстрируют графики рис. 11.

Рис. 10. Результаты моделирования движения привязной системы при изменении глубины погружения на скорости хода 1 м/с: 1 – траектория АНПА, 2 – траектория ПМР, 3 – форма кабеля связи

Рис. 11. Результаты моделирования движения привязной системы при движении по траектории «меандр» на скорости хода 1 м/с: 1 – траектория АНПА, 2 – траектория ПМР, 3 – форма кабеля

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы:

- выявлено наличие «оптимальной» длины кабеля связи, обеспечивающей отсутствие вертикальной составляющей реакции кабеля на аппарат и минимизацию возмущения от буксировки ПМР;
- определены зависимости «оптимальной» длины кабеля связи от скорости буксировки и заданной глубины движения АПР, которые могут быть реализованы в контуре управления буксирной лебедкой ПМР, обеспечивающем минимальное гидродинамическое сопротивление кабеля с поплавком и, как следствие, максимальную автономность привязной системы в целом;
- разработана структура динамической модели системы управления движением привязной системы, определены модели динамики подводного аппарата, его движительно-рулевого комплекса, кабельной линии связи и поверхностного модуля радиосвязи;
- в ходе модельного эксперимента определены параметры движения как буксируемого ПМР, так и АПР,

а также динамика силового воздействия от буксировки на аппарат в типовых режимах его маневрирования;

- результирующая сила возмущений от буксировки ПМР не превышает 25 Н при маневрировании по глубине погружения 0–10–5 м с ходом 1 м/с, длине кабеля связи 20 м и запасе плавучести ПМР не менее 50 Н;
- результирующая сила возмущения от буксировки на аппарат при движении в горизонтальной плоскости по траектории «меандр» со скоростью хода 1 м/с на глубине 10 м не превышает 20 Н.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым Президиумом Российской академии наук, № 7 «Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники», а также гранта № 18-5-054 «Разработка методов синтеза информационно-управляющих систем подводных робототехнических средств для автоматического выполнения подводных операций в условиях частично неопределенного окружения» программы «Приоритетных научных исследований в интересах комплексного развития ДВО РАН».

ЛИТЕРАТУРА

1. Dave K. Retractable UUV Antenna Buoy with Smart Tether GPS. KCF Technologies, US Naval Sea Systems Command SBIR N04-T020.
2. Roger E.R., Jacob C.P., David S.S. «Towed antenna system and method» US Patent № 8.813.669, B2. 26 Aug. 2014.
3. Retractable UUV Antenna Buoy with Smart Tether GPS/ KCF Technologie, Inc. – URL: www.kcftech.com (дата обращения: 24.07.2017).
4. Nishida Y. et al. Development of an autonomous buoy system for AUV // Proc. Conf. OCEANS 2015. Italy, Genova, 2015. P.1–6. doi: 10.1109/OCEANS-Genova.
5. Костенко В.В., Львов О.Ю. Комбинированная система связи и навигации автономного подводного робота с поплавковым модулем // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1 (23). С. 31–43.
6. Быканова А.Ю., Костенко В.В., Львов О.Ю. Варианты применения поплавкового модуля связи и навигации в составе подводных робототехнических комплексов // Материалы 7-й науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 2017. С. 112–118. ISBN 978-5-600-01917-1.
7. Костенко В.В., Мокеева И.Г. Исследование влияния кабеля связи на маневренность телеуправляемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 1 (7). С. 22–27.
8. Костенко В.В., Мокеева И.Г., Толстоногов А.Ю. Особенности управления движением АНПА с буксируемым оборудованием // Материалы 7-й науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 2017. С. 361–366. ISBN 978-5-600-01917-1.
9. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: Дальнаука, 2018. 368 с. ISBN 978-5-7311-0486-79.
10. Kostenko V.V., Tolstogonov A.Y., Mokeeva I.G. The Combined AUV Motion Control with Towed Magnetometer // Proc. 2019 IEEE Underwater Technology (UT). Kaohsiung, Taiwan, 2019. P. 1–7. doi: 10.1109/UT.2019.8734468.
11. Костенко В.В., Мокеева И.Г. Моделирование динамики типовых режимов движения привязной системы «ТНПА – кабель связи» // Материалы 5-й науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 2013. С. 382–388. ISBN 978-5-8044-1409-3.
12. Костенко В.В., Мокеева И.Г., Толстоногов А.Ю. Управление движением АНПА при буксировке магнитометра // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1 (195). С. 78–89.
13. Гой В.А., Костенко В.В., Найденов Д.Н., Михайлов Д.Н., Родькин Д.Н. Опыт разработки и испытаний телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с автономным источником питания // Материалы 6-й науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана», Владивосток. 2015. С. 101–106. ISBN 978-5-8044-1363-2.