

К ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНПА «ММТ-3500» НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Л.В. Киселев, В.В. Костенко, А.В. Медведев

Созданный в ИПМТ ДВО РАН автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) «ММТ-3500» предназначался для глубоководных исследований в Антарктике в связи с участием в комплексной экспедиции АМК-87 в 2022 году. Функциональные возможности АНПА позволяют использовать его также и для решения ряда других научных и прикладных задач. Разнообразием применений АНПА обусловлены актуальные проблемы, относящиеся к оценке и оптимизации тактико-технических и эксплуатационных характеристик аппарата при выполнении рабочих миссий в условиях сложной среды. Работа посвящена оценке динамических характеристик АНПА, определяющих в значительной степени его эффективность при выполнении гидролокационных, геофизических и гидрографических измерений в обследуемых морских акваториях. Полученные оценки основаны на использовании модельных и экспериментальных данных и их сравнении для уточнения параметров используемой модели и оптимизации алгоритмов и параметров управления. Исследуются гидродинамические характеристики АНПА, совершающего пространственные движения в толще воды и вблизи дна. Для управления движением используется движительно-рулевой комплекс (ДРК), параметры которого получены в результате детальных бассейновых и полигонных измерений с учетом пропульсивных характеристик движителей. Для анализа динамических процессов, полученных с помощью разработанной имитационной модели, используются экспериментальные данные работы АНПА «ММТ-3500» в процессе его испытаний и опытной эксплуатации.

Ключевые слова: АНПА «ММТ-3500», динамическая модель, движительно-рулевой комплекс, гидродинамические характеристики, морские эксперименты, Антарктика.

Введение

Динамические свойства АНПА являются результатом оптимального выбора характеристик системы управления, которые, в свою очередь, зависят от гидродинамических характеристик аппарата, движительно-рулевого комплекса (ДРК), параметров управляющих воздействий во всем многообразии пространственных движений. К числу АНПА, созданных в ИПМТ ДВО РАН в последние годы, относится АНПА «ММТ-3500», предназначенный для научных и прикладных исследований на глубинах до 3500 м. Аппарат прошел этап отладочных испытаний и в составе комплексной экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш» в феврале–марте 2022 года участвовал в биологических исследованиях в Антарктике. Результаты данных исследований представлены в работе [1].

При выполнении заданных миссий необходимо было обеспечить требуемые ходовые и динамические свойства АНПА на основе их предварительной оценки. При этом основное условие заключалось в том, чтобы обеспечить работоспособность АНПА при выполнении рабочих действий в процессе запусков. «Тонкие» вопросы, относящиеся к устойчивости движения и точности управления, не рассматривались, хотя косвенно эти свойства отражались на динамике аппарата. Очевидно, представляется актуальной задача, связанная с более полной и точной оценкой динамических характеристик АНПА «ММТ-3500» с возможностью их оптимизации с использованием модельных и экспериментальных данных. Разнообразные применения АНПА предполагают расширение его функциональных возможностей, интеллектуализацию системы управления и программной архитектуры в целом. Для решения данного круга задач используется имитационный комплекс, содер-

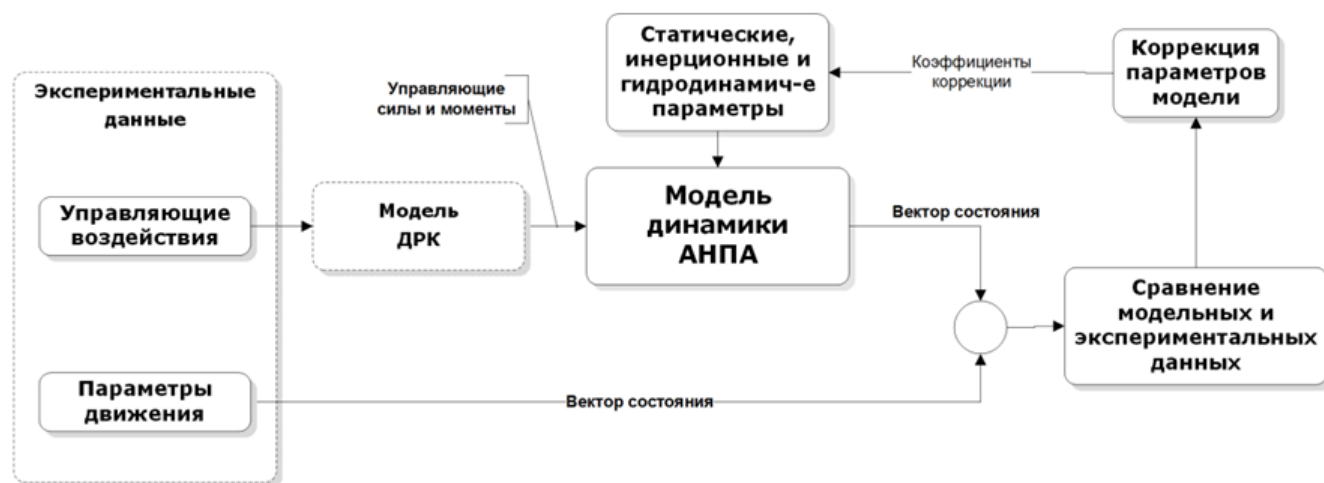


Рис. 1. Блок-схема вычислений для коррекции параметров динамической модели

жащий аппаратно-программные средства для модельных и натурных экспериментов по отладке всех систем АНПА [2–4]. Модификация имитационного комплекса, который используется для исследования динамических свойств АНПА, содержит следующие элементы:

- математическую модель динамики АНПА в типовых режимах движения при выполнении поисково-обследовательских миссий;
- вычислительный инструментарий для определения гидродинамических характеристик АНПА на основе виртуальной продувки его трехмерной модели;
- модель ДРК, учитывающую его конструктивные особенности и характеристики взаимодействия каналов управления;
- модель формирования управляющих воздействий, учитывающую требования к динамическим свойствам АНПА;
- модель для определения уточненной оценки динамических характеристик АНПА;
- модель, отображения всего объема входных и выходных данных.

Для уточнения параметров динамической модели АНПА путем сравнения модельных и экспериментальных данных использовалась вычислительная система, блок-схема которой приведена на рис. 1.

■ Математическая модель динамики АНПА

АНПА «ММТ-3500» имеет конструктивную форму, характерную для большинства поисково-обследовательских АНПА, созданных в ИПМТ ДВО РАН. Миссии, выполняемые АНПА, отвечают его назначению, и задача управления состоит, как правило, в осуществлении программных движений в

вертикальной плоскости (по глубине или расстоянию до дна) и в горизонтальной плоскости (по курсу) со стабилизацией заданных параметров движения. При этом допустимо считать, что крен пренебрежимо мал вследствие хорошей остойчивости аппарата и кинематическая взаимосвязь плоских движений по глубине, курсу и крену осуществляется только через управляющие и возмущающие воздействия. С учетом данных допущений, справедливых для АНПА «ММТ-3500», в ряде предшествующих работ [5–10] принята математическая модель в виде совокупности уравнений, описывающих движение в проекциях на оси инерциальной, скоростной (поточной) и связанной систем координат в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

$$\begin{aligned} m_x \dot{v} &= -R_x(v, \alpha) + P \sin \vartheta + T_{x1} \cos \alpha - T_{y1} \sin \alpha, \\ m_y v \dot{\vartheta} &= R_y(v, \alpha, \dot{\psi}) + P \cos \vartheta + T_{y1} \cos \alpha + T_{x1} \sin \alpha, \\ J_{zz} \ddot{\psi} &= M_0 \sin \psi + M_z(v, \alpha, \dot{\psi}) + M_{z1}, \\ \dot{X} &= v \cos \vartheta, \quad \dot{Y} = -v \sin \vartheta, \quad \psi = \vartheta + \alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} m_x \dot{v} &= -R_x(v, \beta) + T_{x1} \cos \beta - T_{z1} \sin \beta, \\ m_z v \dot{\chi} &= R_z(v, \beta, \varphi) + T_{z1} \cos \beta + T_{x1} \sin \beta, \\ J_{yy} \ddot{\varphi} &= M_y(v, \beta, \dot{\varphi}) + M_{y1}, \\ \dot{X} &= v \cos \chi, \quad \dot{Z} = v \sin \chi, \quad \varphi = \chi + \beta. \end{aligned} \quad (2)$$

В уравнениях (1, 2) использованы обозначения, принятые в указанных выше работах, в частности: $OXYZ$ – инерциальная система координат; $Ax_1y_1z_1$ – система координат, связанная с аппаратом; $Axyz$ – скоростная (поточная) система координат, помещенная в центре масс аппарата и ориентированная осью Ax по вектору скорости v ; $m_x, m_y, m_z, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$ – массы и моменты инерции аппарата с учетом

присоединенных масс и моментов инерции жидкости; $T_{x1}, T_{y1}, T_{z1}, M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}$ – управляющие силы и моменты движительно-рулевого комплекса в связанной системе координат; ϑ, χ – углы подъема и поворота траектории; φ, ψ – углы курса и дифферента аппарата; α, β – углы атаки и дрейфа; $R_x, R_y, R_z, M_x, M_y, M_z$ – гидродинамические силы и моменты; $M_0 = \gamma V_a h_o$ – максимальный момент остойчивости (момент остойчивости, отнесенный к величине $\sin \psi$); γ – удельный вес жидкости; V_a – объемное водоизмещение аппарата; h_o – метацентрическая высота; $P = \gamma V_a$ – остаточная плавучесть аппарата.

Система уравнений (1, 2) содержит нелинейные функциональные элементы, что приводит к известным теоретическим проблемам при обеспечении устойчивости системы по отношению к вектору состояния и параметрам системы управления. Можно получить практическое решение, если ограничить область допустимых начальных отклонений системы исходя из условий задачи и выбором параметров регулятора обеспечить компромисс требований управляемости (маневренности), точности и устойчивости движения «в малом» [7]. Будем считать, что данные условия выполнены для рассматриваемых режимов движения АНПА.

Одна из основных задач исследования состоит в идентификации гидродинамических характеристик АНПА и эксплуатационных параметров ДРК и их оценке путем сравнения динамических свойств аппарата в модельной системе и при его работе в реальных морских условиях.

В табл. 1 приведены некоторые технические характеристики АНПА, определяющие его динамические свойства.

Таблица 1. Параметры динамической модели АНПА

Объем V_a (водоизмещение), м ³	0,49
Максимальная глубина погружения, м	3500
Скорость, м/с	0...2,5
Составляющие массы m_x, m_y, m_z , кг	425, 790, 790
Составляющие момента инерции J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} , Нмс ²	723, 723
Максимальная суммарная продольная тяга T_{x1} , Н	428
Максимальный управляющий момент M_{y1} , Нм	175
Максимальный момент остойчивости M_0 , Нм	28

■ Гидродинамические характеристики АНПА

Для определения гидродинамических характеристик и компонент вектора состояния АНПА исполь-

зовался пакет прикладных программ, включающий следующие процедуры:

- построение трехмерной визуализированной модели аппарата с использованием сборки деталей в САПР SolidWorks (рис. 2);
- расчет гидродинамических характеристик модели методом «виртуальной продувки» (Flow Simulations);
- решение системы уравнений движения, определение компонент вектора состояния и управляющих воздействий (Matlab Simulink).

Выражения для гидродинамических сил и моментов в уравнениях (1) представим в виде:

$$\begin{aligned}
 R_x(v, \alpha) &= R_x(\alpha)v^2, R_x(v, \beta) = R_x(\beta)v^2, \\
 R_y(v, \alpha, \psi) &= R_y(\alpha)v^2 + R_y(\omega)v\dot{\psi}, \\
 R_z(v, \beta, \phi) &= R_z(\beta)v^2 + R_z(\omega)v\dot{\phi}, \\
 M_y(v, \beta, \phi) &= M_y(\beta)v^2 + M_y(\omega)v\dot{\phi}, \\
 M_z(v, \alpha, \psi) &= M_z(\alpha)v^2 + M_z(\omega)v\dot{\psi}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где $R_x(\alpha), R_x(\beta), R_y(\alpha), R_z(\beta), M_y(\beta), M_z(\alpha)$ – зависимости позиционной составляющей гидродинамических сил и моментов от углов атаки и дрейфа, отнесенные к величине v^2 , $R_y(\omega), R_z(\omega), M_y(\omega), M_z(\omega)$ – демпфирующие силы и моменты, зависящие от угловой скорости вращения аппарата в набегающем потоке, отнесенные к величине скорости v .

На рис. 3–5 приведены результаты вычислений гидродинамических воздействий путем «виртуальной продувки» трехмерной модели АНПА в диапазоне углов атаки и дрейфа ($-10^\circ \dots +10^\circ$) при скорости набегающего потока 0,5 м/с, 1 м/с, 1,5 м/с и в «зависании» ($\alpha = \pm 90^\circ$). На рис. 3 приведены зависимости составляющих силы сопротивления в проекциях на оси системы координат для трех значений скорости, а на рис. 4 – их моменты относительно центра масс. Одной из важных характеристик АНПА является его гидродинамическая устойчивость (неустойчивость) по отношению к углу атаки. Это свойство определяется в значительной степени соотношением подъемной силы $R_y(\alpha)$ и ее момента $M_z(\alpha)$ или, иными словами, смещением L точки приложения силы $R_y(\alpha)$ относительно центра масс аппарата при малых значениях угла атаки. Зависимость $L(\alpha)$ приведена на рис. 5, а на рис. 2 в качестве примера была приведена иллюстрация для двух значений угла атаки ($\alpha = +1^\circ$ и $\alpha = -1^\circ$) при скорости потока 1 м/с. Необходимо отметить следующее. Во-первых, в диапазоне рассма-

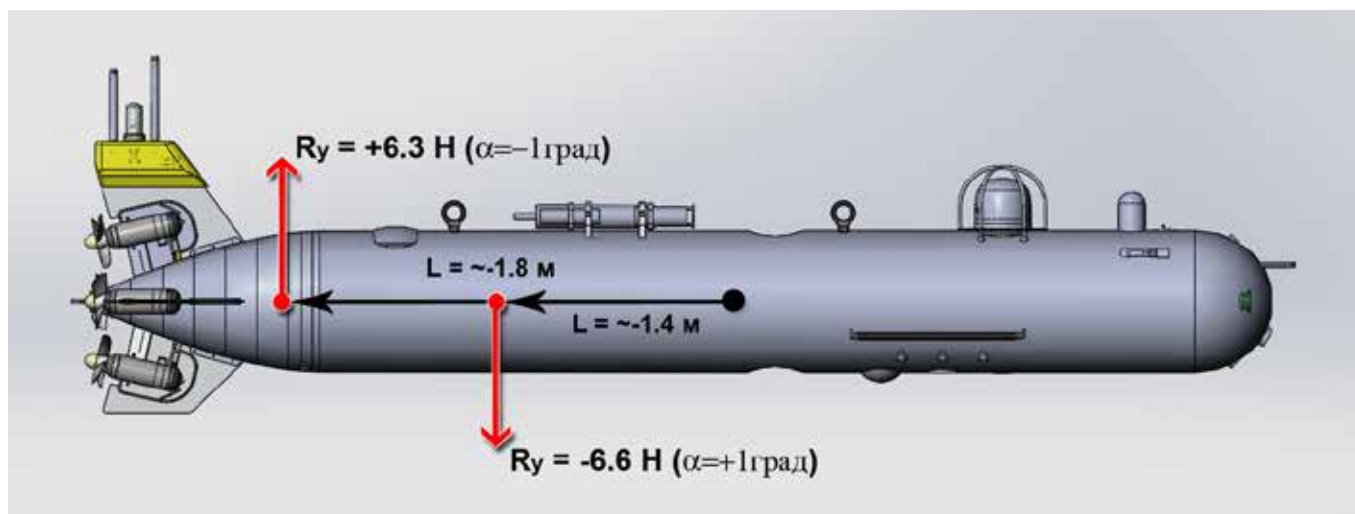


Рис. 2. Визуализированная модель АНПА, величина и положение силы R_y для углов атаки $\alpha = +1^\circ$ и $\alpha = -1^\circ$

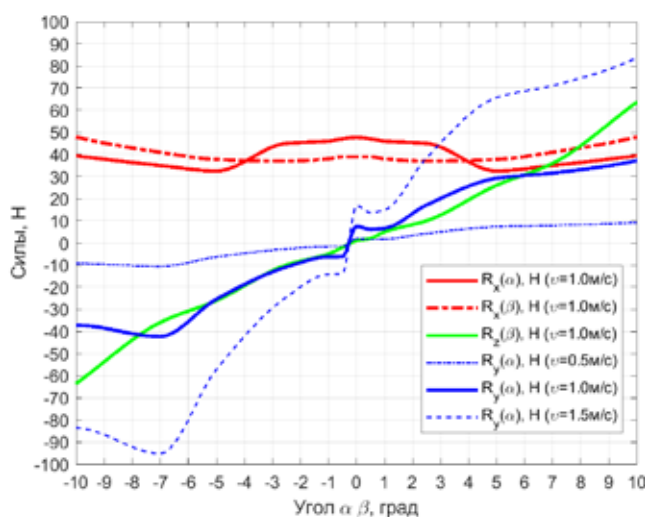


Рис. 3. Зависимости составляющих силы гидродинамического сопротивления от углов атаки и дрейфа

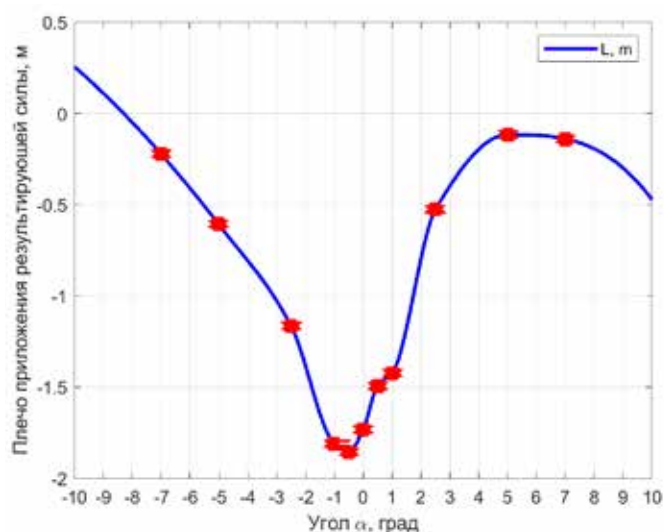


Рис. 5. Зависимость величины смещения L от угла атаки

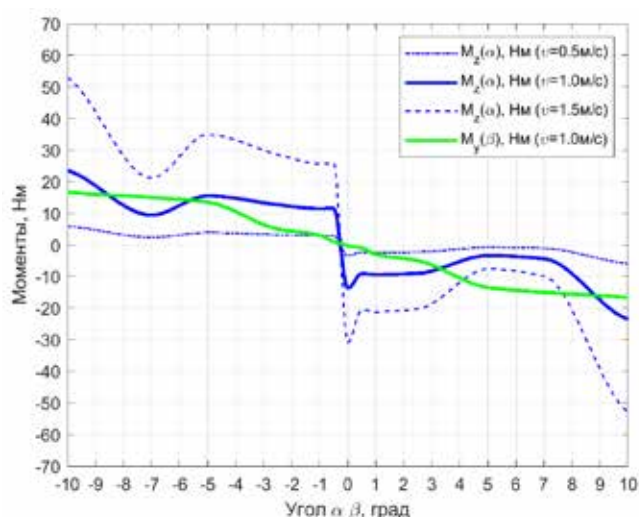


Рис. 4. Зависимости составляющих гидродинамического момента от углов атаки и дрейфа

триваемых углов атаки точка приложения подъемной силы смещена в корму аппарата, что свидетельствует о гидродинамической устойчивости аппарата по отношению к углу атаки. Во-вторых, величина смещения максимальна при наименьших углах атаки и с их увеличением уменьшается до минимума. Такую зависимость можно объяснить влиянием на гидродинамику выступающих частей на корпусе аппарата, минимальном при малых углах атаки, создающих асимметрию обтекания тела набегающим потоком.

■ Управляющие воздействия и характеристики ДРК

Управляющие силы и моменты во всех режимах движения формируются на основе данных о векторе состояния АНПА и эксплуатационных характери-

стик ДРК. Измеряемые компоненты вектора состояния АНПА включают: относительную и абсолютную скорость движения, глубину погружения или расстояние до дна, курс и дифферент аппарата, угловые скорости, навигационные данные о местоположении АНПА. Выходными данными ДРК являются управляющие силы и моменты, создаваемые кормовыми маршевыми движителями и вертикальным подруливающим движителем в носовой части аппарата в соответствии с выражением (4). Компонентная схема ДРК показана на рис. 6, где приняты следующие обозначения: $T_{X1}, T_{Y1}, T_{Z1}, M_{Y1}, M_{Z1}$ – проекции векторов управляющих сил и моментов на оси связанной с аппаратом системы координат (ССК) $AX_1Y_1Z_1$; F_U, F_D, F_L, F_R – тяга верхнего, нижнего, левого и правого кормового движителя соответственно; F_{BT} – тяга вертикального подруливающего движителя, δ – угол наклона маршевых движителей к продольной оси аппарата AX_1 между осями вращения движителей и продольной осью аппарата; L_S, L_B – плечи управляющих моментов ДРК.

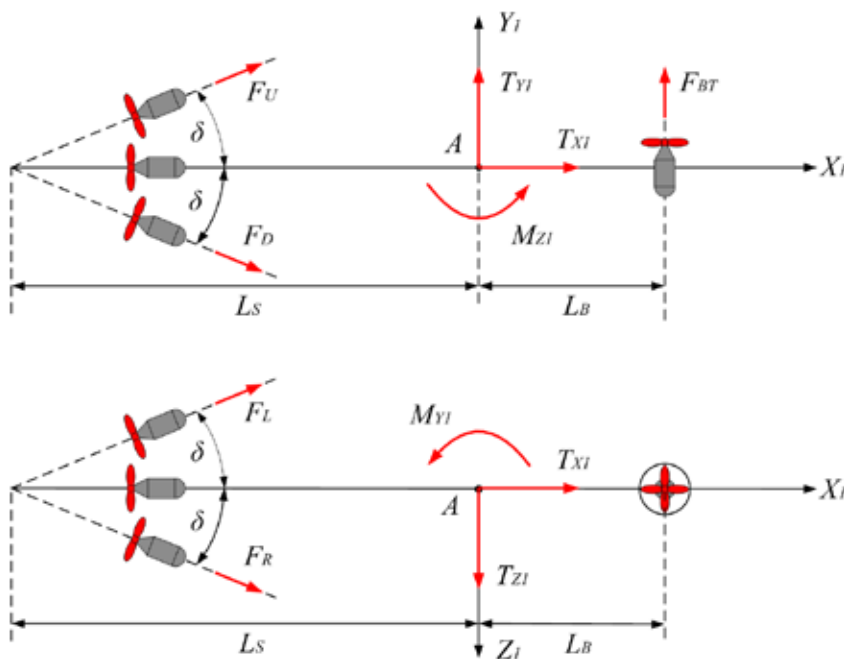


Рис. 6. Компонентная схема ДРК

$$\begin{aligned} T_{X1} &= (F_U + F_D + F_R + F_L) \cos \delta, \\ T_{Y1} &= (F_U - F_D) \sin \delta + F_{BV}, \\ T_{Z1} &= (F_R - F_L) \sin \delta, \\ M_{Y1} &= (F_R - F_L) \sin \delta L_S, \\ M_{Z1} &= F_{BV} L_B - (F_U - F_D) \sin \delta L_S. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналитические выражения статических характеристик маршевого (5) и подруливающего (6) движителей были определены в результате регрессионного анализа результатов бассейновых испытаний, приведенных на рис. 7.

Управляющие силы и моменты во всех режимах движения формируются на основе данных о векторе состояния АНПА и эксплуатационных характеристик ДРК. Измеряемые компоненты вектора состояния АНПА включают: относительную и абсолютную скорость движения, глубину погружения или расстояние до дна, курс и дифферент аппарата, угловые скорости, навигационные данные о местоположении АНПА. Выходными данными ДРК являются упоры и моменты, создаваемые 4 гребными кормовыми маршевыми движителями и вертикальным подруливающим движителем в носовой части аппарата.

$$F_{ST}(U) = \begin{cases} +0,98 U - 9,8 & \text{для } +10 < U \leq +127, \\ 0 & \text{для } |U| \leq +10, \\ +0,72 U + 7,2 & \text{для } -10 > U \geq -127; \end{cases} \quad (5)$$

$$F_{BT}(U) = \begin{cases} 0,77 U - 7,7 & \text{для } +10 < U \leq +127, \\ 0 & \text{для } |U| \leq +10, \\ 0,77 U + 7,7 & \text{для } -10 > U \geq -127; \end{cases} \quad (6)$$

где F_{ST} – упор маршевого движителя, F_{BT} – упор подруливающего движителя, $|U| \leq 127$ – функция управления движителем.

Основные характеристики ДРК сведены в табл. 2, где приняты следующие обозначения: $F_{ST}^{\max}$ – максимальные упоры маршевых движителей; $F_{BT}^{\max}$ – максимальные упоры подруливающего движителя; $T_{X1}^{\max}, T_{Y1}^{\max}, M_{Y1}^{\max}, M_{Z1}^{\max}$ – максимальные управляющие воздействия комплекса.

Реализованный в АНПА «ММТ-3500» вариант независимого распределения управляющих воздействий регуляторов движения между движителями ДРК соответствует выражению:

$$\begin{aligned} F_U &= \frac{T_{X1}^{\max} \Pi_X}{4 \cos \delta} - \frac{M_{Z1}^{\max} \Pi_\psi}{2 \sin \delta L_S}, \quad F_D = \frac{T_{X1}^{\max} \Pi_X}{4 \cos \delta} + \frac{M_{Z1}^{\max} \Pi_\psi}{2 \sin \delta L_S}, \\ F_{BT} &= T_{Y1}; \\ F_L &= \frac{T_{X1}^{\max} \Pi_X}{4 \cos \delta} - \frac{M_{Y1}^{\max} \Pi_\phi}{2 \sin \delta L_S}, \quad F_R = \frac{T_{X1}^{\max} \Pi_X}{4 \cos \delta} + \frac{M_{Y1}^{\max} \Pi_\phi}{2 \sin \delta L_S}, \end{aligned} \quad (7)$$

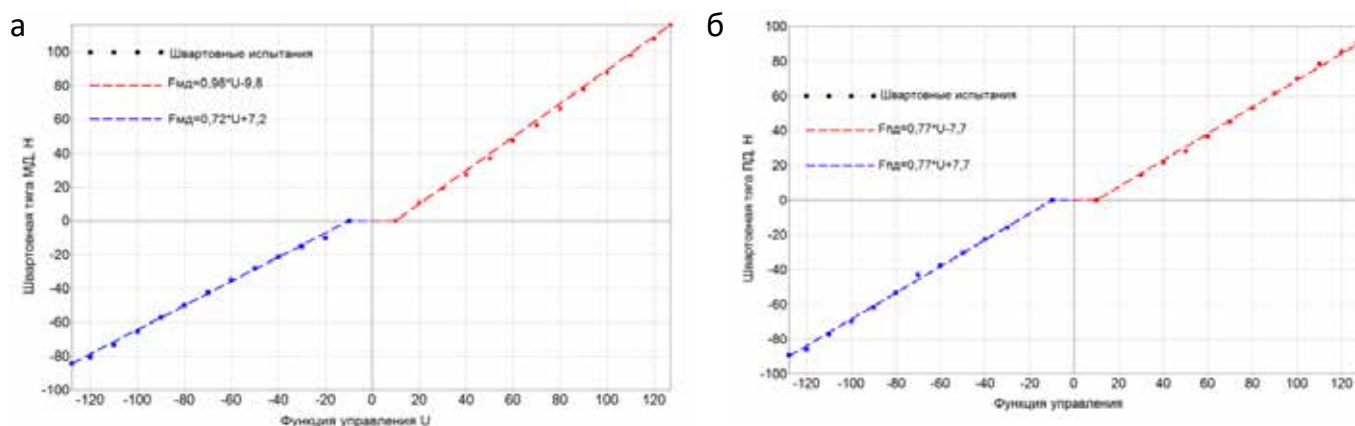


Рис. 7. Статические характеристики маршевых (а) и подруливающего (б) движителей

Таблица 2. Основные характеристики ДРК

L_S , м	L_B , м	F_{ST}^{max} , Н	F_{BT}^{max} , Н	T_{X1}^{max} , Н	T_{Y1}^{max} , Н	M_{Y1}^{max} , Нм	M_{Z1}^{max} , Нм
2,04	0,20	+115,9 -84,5	+90,6 -89,1	+428,3 -312,3	+179,3 -153,8	±156,5	±174,6

где $\Pi_X, \Pi_\varphi, \Pi_\psi$ – «сжимающие» коэффициенты распределения управляющих воздействий конкурирующих каналов между маршевыми движителями. При этом с учетом допущения линейности статических характеристик движителей было использовано прямое распределение управляющих воздействий с масштабированием, в ходе которого осуществляется итерационный поиск «сжимающих» коэффициентов, обеспечивающих сочетание независимости каналов управления с максимальным использованием эффективности ДРК [11–13]. Функциональная схема управления ДРК показана на рис. 8, где использованы следующие обозначения:

$T_{X1}^R, T_{Y1}^R, M_{Y1}^R, M_{Z1}^R$ – управляющие воздействия, сгенерированные системой программного управления аппарата; $F_{ST}^\psi, F_{ST}^\delta, F_{ST}^\phi$ – упоры маршевых движителей, распределенные между конкурирующими каналами управления дифферентом, ходом и курсом; $U(F)$ – управляющая функция, обратная статической характеристике движителя; $U_{BT}, U_U, U_D, U_L, U_R$ – управляющие функции движителей.

В результате обработки результатов швартовых испытаний движителей были установлены следующие управляющие функции, обратные статическим характеристикам движителей:

$$U_S(F) = \begin{cases} +1,025 F + 10 & \text{для } F > 0, \\ +1,385 U - 10 & \text{для } F \leq 0; \end{cases} \quad (8)$$

$$U_{BT}(F) = \begin{cases} 1,295 F + 10 & \text{для } F > 0, \\ 1,295 F - 10 & \text{для } F \leq 0. \end{cases} \quad (9)$$

В табл. 3 приведены максимальные значения управляющих воздействий ДРК с учетом равноправного распределения эффективности движителей между конкурирующими каналами управления $\Pi_X = \Pi_\varphi = \Pi_\psi = 0,5$. При этом в соответствии с рис. 8 управляющий момент по дифференту M_{Z1}^{max} формируется без участия подруливающего движителя, а управляющая вертикальная тяга – без участия вертикальной пары маршевых движителей.

Таблица 3. Ограничения управляющих воздействий ДРК после равноправного и фиксированного распределения эффективности движителей между регуляторами движения

T_{X1}^O , Н	T_{Y1}^O , Н	M_{Y1}^O , Нм	M_{Z1}^O , Нм
+214,2 -156,1	+90,6 -89,1	±78,2	±78,2

■ Сравнительные результаты моделирования динамики АНПА и натурных морских экспериментов

Анализ динамики АНПА по результатам моделирования осуществлялся с использованием экспериментальных данных, полученных в процессе

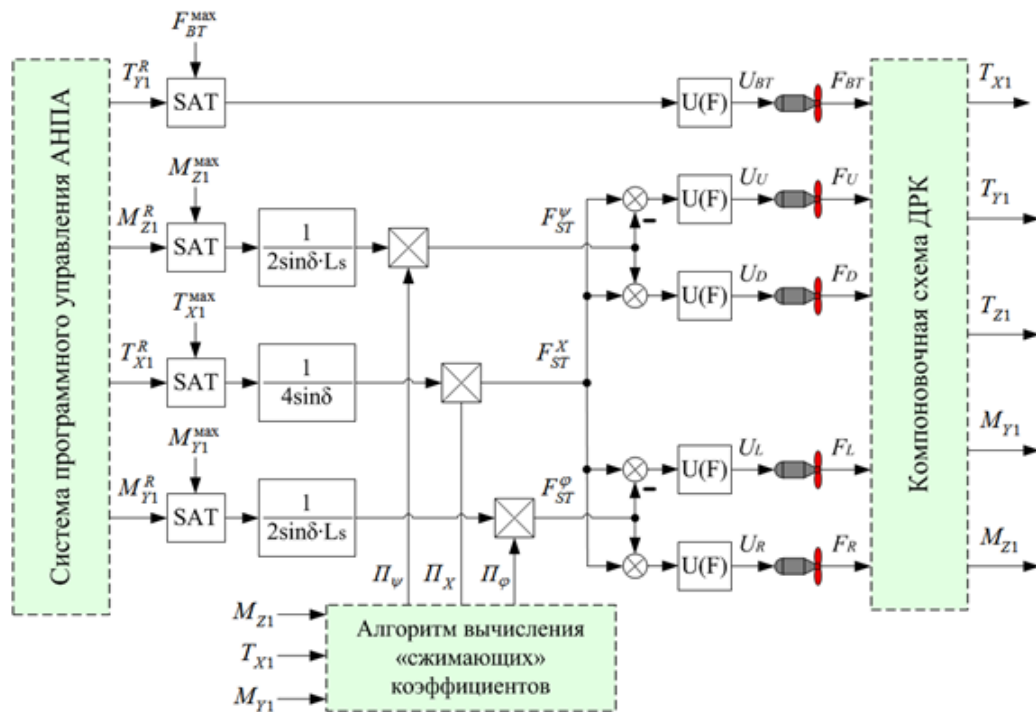


Рис. 8. Функциональная схема управления движительно-рулевым комплексом

рабочих запусков АНПА в Антарктиде и в мелководной бухте Патрокл залива Петра Великого. Далее на рис. 9–14 приведены для сравнения результаты моделирования и экспериментальные данные, полученные аппаратно-программными средствами АНПА. Необходимо отметить следующее. В процессе испытаний АНПА характеристики ДРК оценивались по результатам швартовых измерений. Использование этих данных в качестве исходных для моделирования вносит определенные погрешности как в модельные процессы, так и в оценку характеристик модели динамики АНПА. Кроме того, регуляторы движения в системе управления АНПА и в имитационной модели имеют определенные различия, поскольку реализованы различными аппаратно-программными средствами. Наконец, миссии и режимы движения АНПА в ходе испытаний имеют ряд технологических и эксплуатационных особенностей, учесть которые в модели достаточно сложно. Очевидно, что достигнуть точного соответствия процессов представляется весьма проблематичным, поэтому гидродинамические параметры модели корректировались по признакам «близости» модельных и экспериментальных процессов в переходных и установившихся режимах. Под «близостью» модельных и экспериментальных процессов будем понимать ситуацию, когда различие в параметрах движения оценить количественно достаточно сложно (если учитывать условия проведения экспе-

риментов), но можно судить в целом об адекватности рассматриваемых процессов.

На рис. 9 приведены результаты отладочных испытаний АНПА в мелководной бухте. Цель экспериментов заключалась в уточнении характеристик ДРК и динамики аппарата в режимах «позиционирование», «крейсерских ход», «маневр по курсу». Все динамические процессы моделировались с учетом экспериментальных характеристик ДРК. В режиме «позиционирование» аппарат осуществлял вертикальное погружение и всплытие по глубине на 3 м под действием движителей с продольным перемещением со скоростью 0,5 м/с. Экспериментальные и модельные результаты в режиме «позиционирование» представлены в графическом виде на рис. 10. Модельные данные получены с использованием ПД-регуляторов с ограничением на величину управляющих воздействий.

Некоторое различие в переходных процессах можно объяснить влиянием гидродинамики при движении с большими углами атаки.

Экспериментальные и модельные данные, иллюстрирующие динамику АНПА в режиме «крейсерский ход», приведены на рис. 11. Движение под действием маршевых движителей со скоростью 1,2 м/с осуществлялось по программе отработки рассогласования глубины с 3 до 6 м, ход со стабилизацией глубины, всплытие на глубину 3 м. При моделировании данной программы движения с исходными экс-

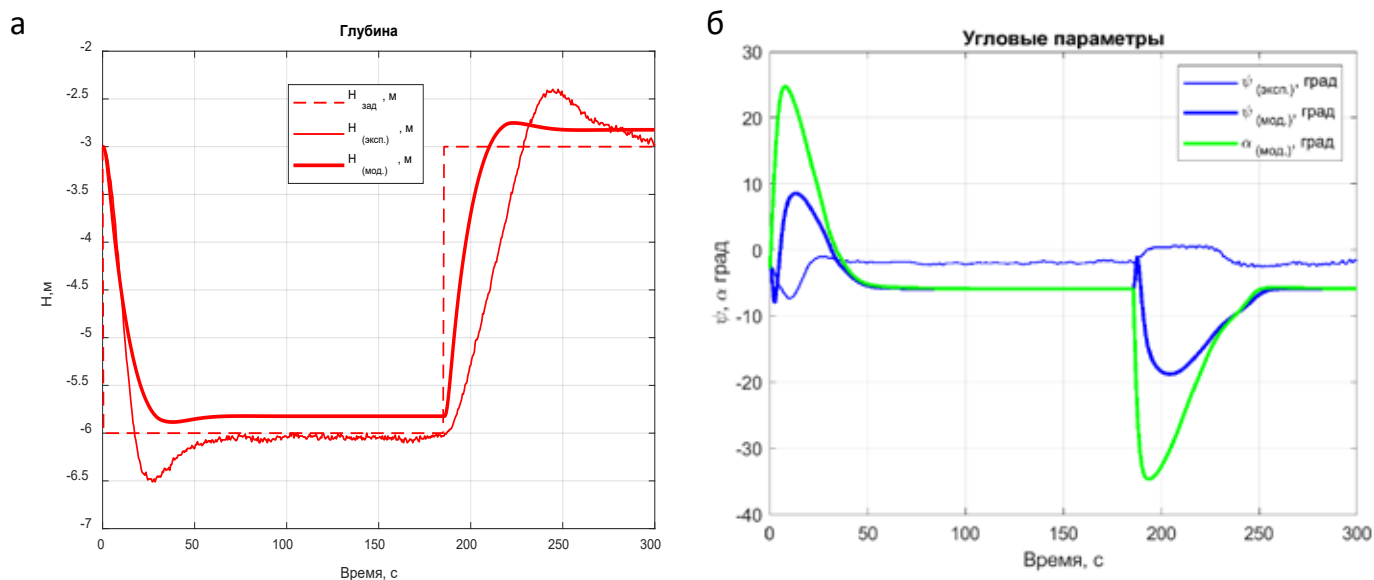


Рис. 9. Режим «позиционирование»: глубина (а), угловые параметры (б)

периментальными данными использовался ПД-регулятор с параметрами, обеспечивающими «близость» модельных и экспериментальных процессов с учетом удовлетворительных требований к качеству управления.

Отметим некоторые особенности представленных процессов. Выполнение заданной программы движения начинается со стартовой точки на глубине 2,5 м с некоторым (небольшим) подвсплыванием на начальном участке движения. В эксперименте установившееся движение имеет статическую ошибку по глубине около 0,5 м, в модельном процессе статическая ошибка по глубине составляет

0,28 м при действии плавучести 10Н, и процессы стабилизации при выбранных параметрах регулятора имеют аperiodический характер. Некоторое различие в процессах не имеет в данном случае принципиального значения и может служить для уточнения исходных модельных и экспериментальных данных.

В режиме «маневр по курсу» осуществлялся поворот на 180° без хода. Параметры движения представлены на рис. 10.

Характер процессов достаточно очевиден. При этом регулятором курсового канала обеспечивается «близость» экспериментальных и модельных данных.

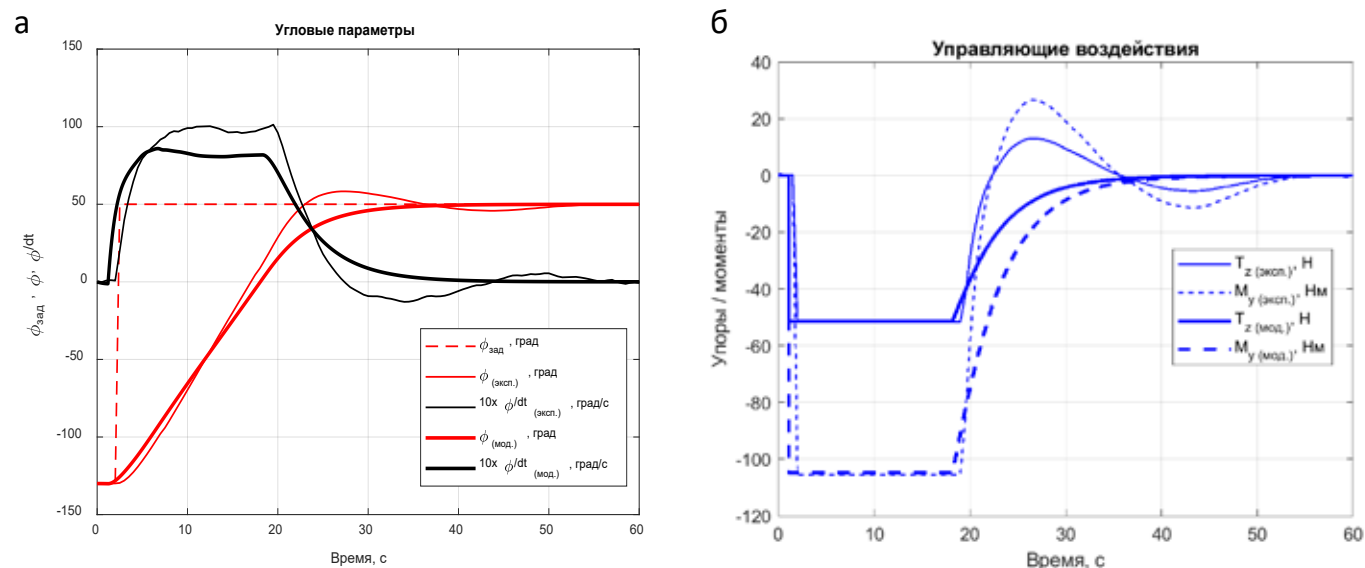
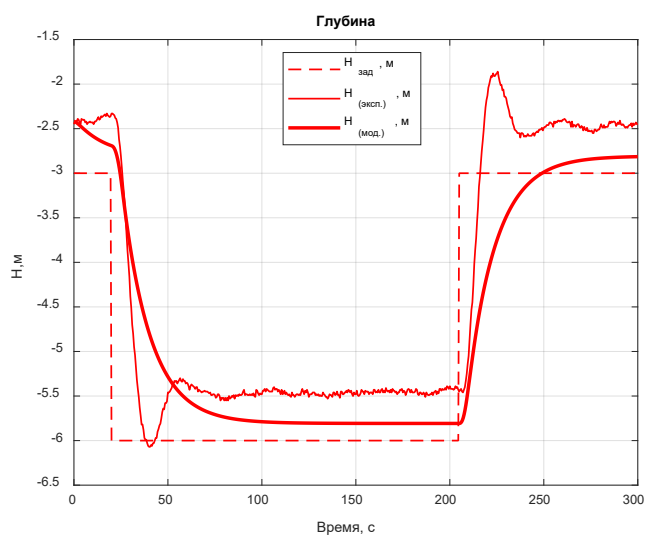


Рис. 10. Режим «маневр по курсу»: угловые параметры (а), управляющие воздействия (б)

а



б

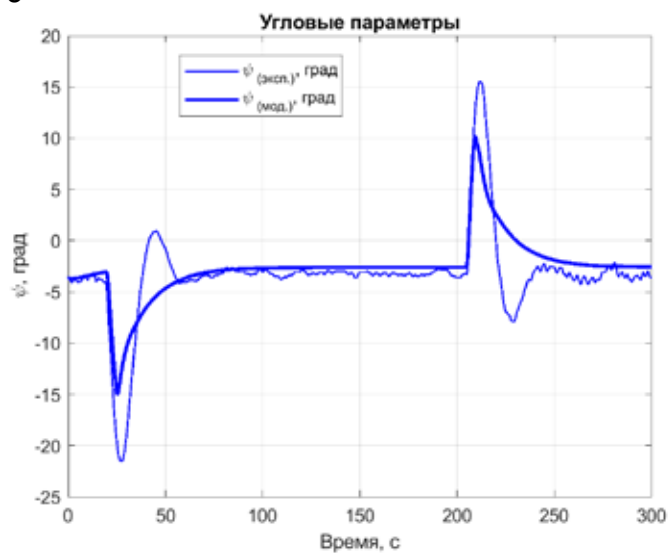


Рис. 11. Режим «крейсерский ход»: глубина (а), угловые параметры (б)

При работе АНПА в условиях Антарктики программа движения включала погружение по спиралевидной траектории под действием маршевых движителей до заданной глубины и переход в режим стабилизации глубины со скоростью 1,1 м/с. На участке погружения осуществлялась совместная работа каналов по глубине и курсу, чем обусловлены взаимосвязанные гидродинамические зависимости по углам атаки и дрейфа. В модельном представлении учесть все особенности эксперимента достаточно сложно, поэтому рассматривался упрощенный вариант модельного движения с ПД-регуляторами по глубине и курсу. На рис. 12 приведены угловые параметры движения для одного из пусков АНПА на глубину 1750 м. Данные относятся к фрагменту заключительного участка погружения и перехода к стабилизации глубины. Интервал времени на графике соответствует реальному процессу. Некоторое различие в модельных и экспериментальных данных объясняется отмеченными выше особенностями эксперимента и неточностью определения исходных данных по управляющим воздействиям и гидростатическим характеристикам аппарата. Эти различия

не являются существенными для уточнения характеристик модели.

Заключение

В работе представлен анализ динамических характеристик АНПА «ММТ-3500» в различных режимах движения путем сравнения модельных и экспериментальных данных. Экспериментальные данные получены в процессе морских отладочных испытаний и опытной эксплуатации АНПА в Антарктике.

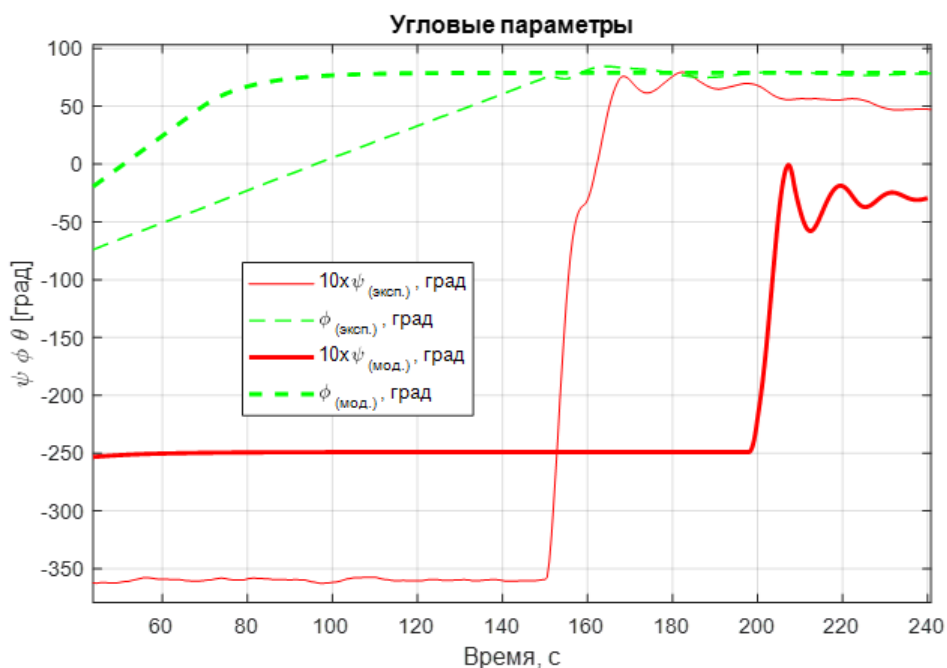


Рис. 12. Угловые параметры на конечном участке движения при пуске АНПА в Антарктике

При моделировании динамических процессов учитывались экспериментальные данные АНПА и ДРК, а также гидродинамические характеристики аппарата, полученные путем виртуальной продувки его трехмерной модели с помощью имитационного комплекса. Показана «близость» модельных и экспериментальных процессов в рассматриваемых режимах движения. Более точный анализ динамики АНПА предполагает проведение натурных экспериментов по уточнению характеристик АНПА и ДРК, а также коррекцию параметров динамической модели с учетом более точных данных. Результаты исследования ориентированы на совершенствование системы

управления движением АНПА для различных применений научного и прикладного характера.

Работа выполнена по теме государственного задания ИПМТ ДВО РАН «Исследование и разработка принципов создания multifunctional робототехнических комплексов для изучения и освоения Мирового океана» (№1210304000088-1)

Авторы выражают признательность Д.С. Михайлову за активное участие в подготовке и проведении экспериментальных работ и предоставленные материалы по теме данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаев Р.А., Боровик А.И., Ваулин Ю.В., Елисеенко Г.Д., Михайлов Д.Н., Найдено Н. А. Применение АНПА «ММТ-3500» для научных исследований в Атлантическом секторе Антарктики (в настоящем номере журнала).
2. Инзарцев А.В., Сидоренко А.В., Сенин Р.А., Матвиенко В.Ю. Комплексное тестирование программного обеспечения АНПА на базе имитационного моделирующего комплекса // Подводные исследования и робототехника. 2009. №1(7). С. 9–14.
3. Бобков В.А., Борисов Ю.С., Инзарцев А.В., Мельман С.В. Моделирующий программный комплекс для исследования методов управления движением автономного подводного аппарата // Программирование. 2008. Т. 34, № 5. С. 257–266.
4. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Медведев А.В., Павин А.М., Севрюк А.В., Сенин Р.А. Бобков В.А., Борисов Ю.С., Мельман С.В. Имитационный моделирующий комплекс для «интеллектуального» автономного подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 2. С. 46–52.
5. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под общей ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 400 с.
6. Инзарцев А.В. Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение, [отв.ред.Л.В.Киселев], Владивосток: Дальнаука, 2018. 367 с.
7. Киселев Л.В., Медведев А.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 1(13). С. 24–35.
8. Kiselev L.V., Bagnitskii A.V., Medvedev A.V. Identification of AUV Hydrodynamic Characteristics Using Model and Experimental Data // Gyroscopy and Navigation. 2017. V. 8, No. 3. P. 217–225.
9. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Selected Features of Autonomous Underwater Robot Dynamics Under Near-Bottom Equidistant Motion Control // Gyroscopy and Navigation, 2019, V. 10, No. 2. P. 90–98.
10. Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V. Motion Control Model and HUV Dynamics for Patrolling Sea Areas with Complex Bottom Topography. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 988 (2022) 022080.
11. Durham W.C. Constrained control allocation // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012. No. 16(4). P. 717–725.
12. Kostenko V. V., Tolstogonov A. Y. A comparative analysis of control allocation methods applied to autonomous underwater vehicles // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. V. 1864, No. 1. P. 012145.
13. Костенко В.В., Павин А.М. К вопросу обеспечения независимости управляющих воздействий движительно-рулевого комплекса подводного аппарата // Материалы 6-й научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 2015. С. 118–123.

Об авторах

КИСЕЛЕВ Лев Владимирович, д.т.н., г.н.с.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов: подводная робототехника, автономные и гибридные подводные роботы, системы управления и навигации, динамические модели, траекторное обследование геофизических полей.

Тел.: +7(902)506-16-77

E-mail: levkiselev1@yandex.ru, kiselev@marine.febras.ru

ORCID ID: 0000-0001-9312-9708

КОСТЕНКО Владимир Владимирович, к.т.н., в.н.с. заведующий лабораторией исполнительных устройств и систем телеуправления

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: подводная робототехника, системы управления движением, движительно-рулевые комплексы, динамические модели, буксируемые системы.

Тел.: +7 (984) 145-43-85

E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru

SPIN-код: 2310-3141

ORCID ID: 0000-0002-3821-3787

Resercher ID: AAF-6399-2021

Scopus ID: 57189036440

МЕДВЕДЕВ Андрей Владимирович – с.н.с.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов: подводная робототехника, вычислительные системы и модели, динамика систем управления, гидродинамика подводных роботов.

Тел.: +7(914)708-10-14

E-mail: auv@list.ru

ORCID ID: 0000-0001-5678-8966