

# УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ И ДИНАМИКА ГИБРИДНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ ПАТРУЛИРОВАНИИ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ ПО ЭКВИДИСТАНТНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ В СЛОЖНОМ РЕЛЬЕФЕ ДНА

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

Рассматривается система управления движением гибридного необитаемого подводного аппарата (ГНПА), предназначенного для патрулирования морских акваторий с целенаправленным поиском инспектируемых донных объектов. Постановка задачи стеснена требованиями, предъявляемыми к параметрам движения ГНПА по эквидистантным траекториям относительно профиля рельефа дна с преодолением препятствий и переходом в динамическое позиционирование в малой окрестности обследуемых объектов (целей). Исходные данные для решения задачи включают: визуализированное 3D-представление фрагмента рельефа дна, математическую модель пространственного движения ГНПА, вычислительный инструмент для «виртуальной продувки» модели прототипа ГНПА, математическую модель движительно-рулевого комплекса, характеристики многоканальной эхолокационной системы переднего обзора. Алгоритм управления движением содержит процедуры, обеспечивающие выполнение заданных требований по планированию (маршрутизации) пространственных траекторий и динамическим свойствам в различных режимах управления. Представлены результаты вычислительного эксперимента с использованием пакетов прикладных программ StateFlow Simulink Matlab, позволяющие оценить комплекс мер для практической реализации требований задачи в структуре управления экспериментального образца ГНПА.

**Ключевые слова:** автономные, телеуправляемые, гибридные необитаемые подводные аппараты (АНПА, ТНПА, ГНПА), патрулирование морских акваторий, динамические и вычислительные модели, управление движением, гидродинамика, движительно-рулевые комплексы.

## Введение

Патрулирование морских акваторий относится к числу основных задач ГНПА при выполнении как типовых поисково-обследовательских работ, так и ряда работ специального назначения при обслуживании морских инфраструктур [1]. В задачу патрулирования входит целенаправленный выбор маршрута движения ГНПА с поиском и обследованием объектов (целей), что предполагает использование эффективного управления в условиях неопределенности среды и корректной динамической модели движения при наличии возможных ошибок в исходных данных. Задача патрулирования рассматривается с учетом того, что ГНПА интегрирует в себе функции автономного и телеуправляемого аппаратов. Это означает, что при выполнении работ, связанных с маршрутизацией

ей движения, ГНПА функционирует как АНПА, а при детальном обследовании (инспекции) объектов ГНПА реализует функции ТНПА.

Особую сложность в задаче представляет осуществление пространственного движения ГНПА (АНПА) вблизи дна с изменчивым рельефом и наличием значительных препятствий по маршруту движения. В общем случае требуется обеспечивать эквидистантное движение относительно дна с безопасным преодолением препятствий и минимизацией затрат на движение [2–5]. Решение этой задачи зависит от силовых характеристик движительно-рулевого комплекса и особенностей дальномерных средств обнаружения препятствий (эхолокационных систем переднего и нижнего обзора). Алгоритм управления строится на основе многоканальной дальномерной информации до препятствий и угловой ориентации

ГНПА относительно профиля рельефа дна. В модели динамики ГНПА использованы конструктивные и гидродинамические характеристики гибридного аппарата, полученные в работе [6]. Далее представлены результаты исследования по рассматриваемым вопросам на основе моделирования динамических процессов с использованием программных средств StateFlow, Simulink, Matlab и имеющихся экспериментальных данных.

## ■ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При постановке задачи патрулирования морской акватории необходимо прежде всего определить характер сложности (изменчивости) рельефа дна с точки зрения наличия в нем препятствий и соответствующие средства управления движением по эквидистантным траекториям на заданном расстоянии от дна. Далее будем понимать под «сложным рельефом дна» рельеф, в котором размеры препятствий по ходу движения ГНПА превышают величину дистанции до препятствия, необходимую для безопасного маневра по преодолению препятствия, а углы склона превышают максимальную величину создаваемого при этом угла подъема или поворота траектории. Речь может идти о препятствиях, размеры которых составляют десятки и сотни метров, углы склона 20–25 градусов, а расстояние до дна (по нормали к профилю дна) 5–10 метров. Подобные условия могут иметь место, например, при обследовании подводных гор (гайотов) [7, 8], и основная цель задачи патрулирования состоит в съемке и картографировании рельефа дна и геологических объектов. В некотором смысле

обращенная (инверсная) задача представляется актуальной и при осуществлении эквидистантного движения относительно нижней кромки льда в условиях Арктики [9–11] или в иных ледовых условиях. Аналогичная задача возникает и при обследовании подводных инфраструктур в районах с менее изменчивым рельефом дна, но с более сложным характером обследовательских работ. Далее в качестве примера реального рельефа дна приведен фрагмент батиметрической карты морской акватории в Татарском проливе, 3D-изображение которого показано на рис. 1. Там же условно определено расположение объектов (целей), подлежащих инспекции. В данном фрагменте имеются относительно сложные участки рельефа дна с препятствиями в масштабе батиметрической карты. Следует отметить, что при построении вычислительной модели движения ГНПА учитываются вычислительная сложность решаемой задачи и производительность вычислителя, и в связи с этим возникает необходимость в пространственно-временном масштабировании информационно-измерительных и динамических процессов. Подобная проблема особенно актуальна, когда требуется обеспечить повышенную точность производимых вычислений при моделировании многокилометровых траекторий движения.

При эквидистантном движении вблизи дна с безопасным преодолением препятствий используется дальномерная информация 5-канальной эхолотационной системы (ЭЛС), эхолотаторы которой с узкой диаграммой направленности расположены в переднем и нижнем секторах обзора. Измеряемые эхолотаторами расстояния до дна  $d_i$  распределены под некоторыми углами относительно продольно оси аппарата следующим образом:  $d_1$  – вниз по нормали,

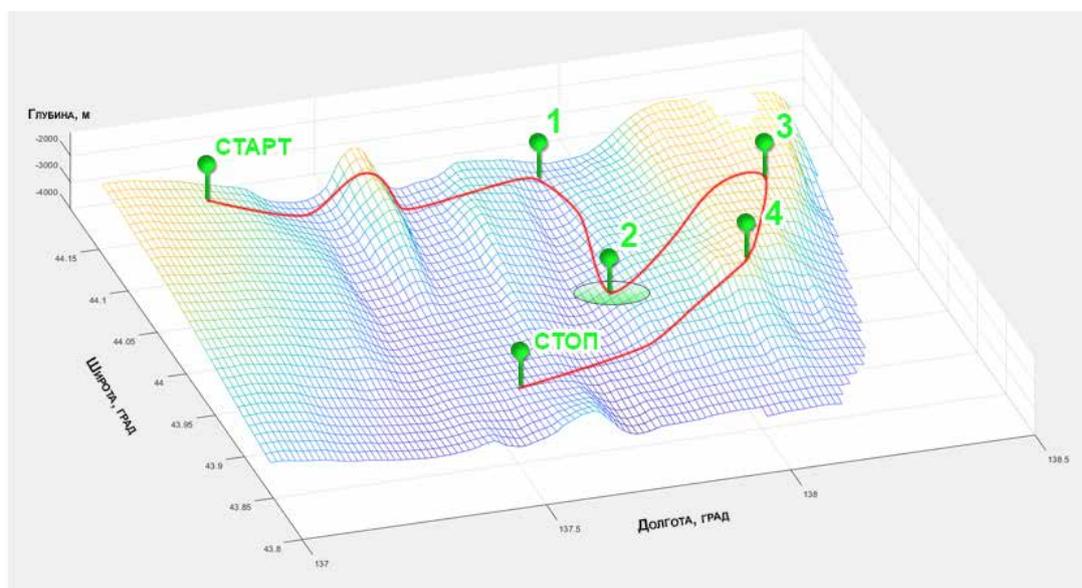


Рис. 1. Восстановленное 3D-изображение фрагмента рельефа дна в Татарском проливе с указанием места расположения инспектируемых объектов

$d_2$  – наклонно вперед и вниз,  $d_3$  – прямо вперед,  $d_4$  – наклонно вперед и вправо,  $d_5$  – наклонно вперед и влево. Обозначим через  $\gamma_{2,1}, \gamma_{3,2}$  соответственно углы между лучами эхолотаторов  $d_2, d_1$  и  $d_3, d_2$  в вертикальной плоскости и  $\gamma_{4,2}, \gamma_{5,2}$  между лучами  $d_4, d_2$  и  $d_5, d_2$  в горизонтальной плоскости. Измеряемое расстояние до дна и расстояние по нормали к поверхности дна в вертикальной плоскости  $\tilde{h}$  связаны тригонометрическим выражением:  $\tilde{h} = d_1 \cos(\psi - \theta_v)$ , где  $\psi$  – дифферент аппарата,  $\theta_v$  – угол наклона в вертикальной плоскости (рис. 2). Аналогичное выражение можно получить и для измерения параметров в горизонтальной плоскости.

Если профиль рельефа дна известен и может быть при этом задан в модели аналитической функцией, то уравнение эквидистанты определяется простым смещением этой функции на заданную величину. Реально данные о профиле рельефа дна формируются в процессе движения на основе эхолотационных данных, и задача состоит в формировании управляющих воздействий, обеспечивающих движение по траектории, близкой к некоторой «прогнозируемой» эквидистанте относительно дна. Фактически это означает стабилизацию высоты от дна по вертикали или по нормали к поверхности дна с использованием данных ЭЛС (рис. 2). Кратчайшее расстояние от центра масс аппарата до дна при переменном рельефе можно определить одной из двух величин – высотой  $h$  по вертикали или  $\tilde{h}$  по нормали к поверхности дна. Различие между этими двумя величинами зависит от дифферента аппарата и крутизны склона, относительно которого осуществляется движение. Задача стабилизации движения по эквидистанте от дна заключается в том, чтобы траектория аппарата с определенной точностью воспроизводила профиль

рельефа с удержанием заданного расстояния до дна. Это означает, что при движении вдоль склона переменной крутизны на заданном расстоянии от дна необходимо выдерживать ориентацию аппарата в соответствии с текущей величиной угла склона.

Приблизненно угол наклона в вертикальной плоскости определяется с помощью соотношения, которое связывает измеряемые расстояния до дна, дифферент и углы между лучами дальномеров  $\gamma_{2,1}, \gamma_{3,2}$ :

$$\theta_v = \psi + (\gamma_{2,1} + \gamma_{3,2}) - \arctg(d_2 \sin \gamma_{2,1} / (d_1 - d_2 \cos \gamma_{2,1}))$$

Далее в расчетах для конкретности принято  $\gamma_{2,1} = \gamma_{3,2} = \gamma_{4,2} = \gamma_{5,2} = \pi/4$ , так что угол наклона в вертикальной плоскости определяется выражением:

$$\theta_v = \psi + \pi/2 - \arctg(d_2 / (d_1 \sqrt{2} - d_2)).$$

Аналогичное выражение для горизонтальной плоскости имеет вид:

$$\theta_{gr} = \chi + \pi/2 - \arctg(d_4 / (d_2 \sqrt{2} - d_4)),$$

$$\theta_{gl} = \chi + \pi/2 - \arctg(d_5 / (d_2 \sqrt{2} - d_5)),$$

$\theta_{gr}, \theta_{gl}$  – углы склона справа и слева относительно направления движения,  $\chi$  – угол поворота траектории в горизонтальной плоскости.

## ■ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ГНПА

В ряде известных предшествующих работ (например, [12, 13]) для описания динамики подводного аппарата общего вида используется обобщенный вектор состояния, компонентами которого служат позиционные и угловые скорости относительно связанных с аппаратом осей вращения. При этом речь

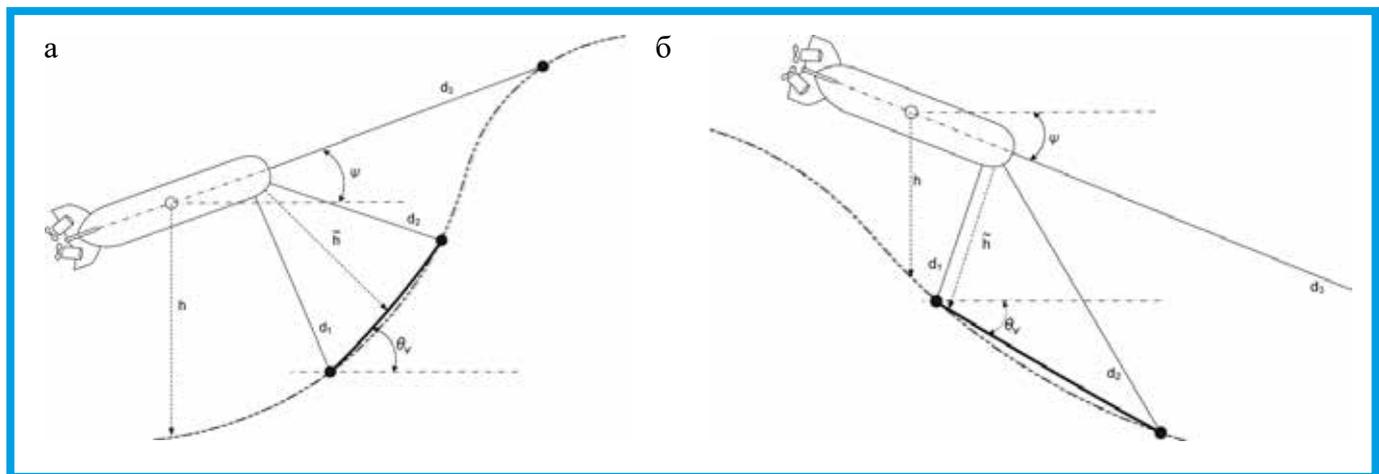


Рис. 2. Ориентация ГНПА относительно профиля рельефа дна в вертикальной плоскости: а – на подъеме, б – на спуске

идет в основном об установлении аналитических выражений для гидродинамических сил, действующих на подводный аппарат при его взаимодействии с вязкой средой. Аналогичная схема применяется в зарубежных исследованиях, посвященных главным образом определению кинематических (геометрических) соотношений между гидродинамическими характеристиками аппарата и параметрами движения [14–15]. При исследовании динамической модели АНПА (ГНПА) в работах [3–6] приняты уравнения движения в «естественных» переменных, участвующих в формировании алгоритмов управления и управляющих воздействий с учетом особенностей навигационного обеспечения. Далее будем рассматривать динамику патрульного ГНПА, выполняющего исследовательские миссии в условиях сложного рельефа дна, используя результаты данных работ. Примем математическую модель в виде совокупности уравнений, описывающих пространственное движение в проекциях на оси инерциальной, скоростной (поточной) и связанной систем координат. При этом предполагается, что кинематическая взаимосвязь плоских движений по глубине, курсу и крену осуществляется только через управляющие и возмущающие воздействия:

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

$$\begin{aligned} m_x \dot{v} &= -R_x(v, \beta) + T_{x1} \cos \beta - T_{z1} \sin \beta, \\ m_z v \dot{\chi} &= R_z(v, \beta, \varphi) + T_{z1} \cos \beta + T_{x1} \sin \beta, \\ J_{yy} \ddot{\varphi} &= M_y(v, \beta, \dot{\varphi}) + M_{y1}, \\ \dot{X} &= v \cos \chi, \quad \dot{Z} = v \sin \chi, \quad \varphi = \chi + \beta. \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} m_z \dot{v} &= -R_z(v, \zeta) + P \sin \kappa + T_{z1} \cos \zeta - T_{y1} \sin \zeta, \\ m_y v \dot{\kappa} &= R_y(v, \zeta, \theta) + P \cos \kappa + T_{y1} \cos \zeta + T_{z1} \sin \zeta, \\ J_{xx} \ddot{\theta} &= M_0 \sin \theta + M_x(v, \zeta, \dot{\theta}) + M_{x1}, \\ \dot{Z} &= v \cos \kappa, \quad \dot{Y} = -v \sin \kappa, \quad \theta = \kappa + \zeta. \end{aligned}$$

В уравнениях (1) 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;  $\vartheta, \chi, \kappa$  – углы подъема, поворота и наклона траектории;  $\varphi, \psi, \theta$  – углы курса, дифферента и крена аппарата;  $\alpha, \beta, \zeta$  – углы атаки, дрейфа и скольжения;  $R_x, R_y, R_z, M_x, M_y, M_z$  – гидродинамические силы и моменты;  $M_0 = \gamma V_a h_0$  – момент остойчивости;  $\gamma$  – удельный вес жидкости;  $V_a$  – объемное водоизмещение аппарата;  $h_0$  – метацентрическая высота;  $P = \gamma V_a - G_a$  – остаточная плавучесть аппарата,  $G_a$  – вес аппарата на воздухе.

Система уравнений (1) содержит нелинейные функциональные элементы, и ее линеаризация возможна только при малых значениях переменных величин, что, очевидно, приводит к известным теоретическим проблемам при обеспечении устойчивости системы по отношению к вектору состояния и параметрам системы управления. Более простое практическое решение можно получить, если ограничить область допустимых начальных отклонений системы условиями задачи и выбором параметров адаптивного регулятора обеспечить компромисс требований управляемости (маневренности), точности и устойчивости движения «в малом» [16]. Будем считать, что данные условия выполнены для всех рассматриваемых режимов движения. Динамические свойства ГНПА при выполнении типовых режимов движения были рассмотрены в работе [6]. С учетом результатов этой работы необходимо оценить динамические свойства ГНПА при целенаправленном эквидистантном движении вблизи дна.

### ■ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГНПА И СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВОГО КОМПЛЕКСА

В качестве аналога ГНПА для вычислительных экспериментов принят аппарат «Freedom ROV» (Oceanering, США), сочетающий в себе особенности автономного и привязного аппаратов [17]. Гидродинамические характеристики ГНПА получены путем «виртуальной продувки» его 3D-модели с возможностью строить визуализированные картины обтекания тела в поле набегающего потока. Внешний вид 3D-модели ГНПА и кинематическая схема ДРК показаны на рис. 3.

Управляющие силы и моменты, соответствующие приведенной схеме, определяются следующими соотношениями:

$$T_x = [(F_{пгк} + F_{лгк}) \cdot \cos \delta_B + F_{лгн} + F_{пгн}] \cdot \cos \delta_\Gamma,$$

$$T_y = (F_{пгк} + F_{лгк}) \cdot \sin \delta_B \cdot \cos \delta_\Gamma + F_{пвк} + F_{лвк} + F_{лвн} + F_{пвн},$$

$$T_z = (F_{пгк} - F_{лгк} + F_{лгн} - F_{пгн}) \cdot \sin \delta_\Gamma,$$

$$M_x = (-F_{пгк} + F_{лгк}) \cdot \sin \delta_B \cdot \cos \delta_\Gamma \cdot Z_{кг} + (-F_{пвк} + F_{лвк} + F_{лвн} - F_{пвн}) \cdot Z_B,$$

$$M_y = (F_{пгк} - F_{лгк}) \cdot \sin \delta_\Gamma \cdot L_{\phi_k} + (-F_{лгн} + F_{пгн}) \cdot \sin \delta_\Gamma \cdot L_{\phi_n},$$

$$M_z = (F_{пгк} + F_{лгк}) \cdot \sin \delta_B \cdot \cos \delta_\Gamma \cdot X_{кг} + (-F_{пвк} - F_{лвк} + F_{лвн} + F_{пвн}) \cdot X_B,$$

$$L_{\phi_k} = X_{кг} + Z_{кг} \cdot \text{ctg} \delta_\Gamma, L_{\phi_n} = X_{кн} + Z_{кн} \cdot \text{ctg} \delta_\Gamma;$$

где:  $T_x, T_y, T_z, M_x, M_y, M_z$  – проекции векторов управляющих сил и моментов на оси связанной с аппаратом системы координат (ССК)  $AX_1Y_1Z_1$ ;  $F_{пгк}, F_{лгк}, F_{лгн}, F_{пгн}$  – тяги кормовой и носовой группы горизонтальных движителей;  $F_{пвк}, F_{лвк}, F_{лвн}, F_{пвн}$  – тяги кормовой и носовой группы вертикальных движителей;  $\delta_\Gamma$  – угол установки

горизонтальных движителей к продольной оси аппарата  $AX_1$ ;  $|\delta_B| \leq \delta_B^{\max} = 30^\circ$  – регулируемый угол поворота кормовой пары горизонтальных движителей;  $X_{кг}, Z_{кг}, X_{кн}, Z_{кн}$  – координаты расстановки горизонтальных движителей в ССК;  $X_B, Z_B$  – координаты расстановки вертикальных движителей в ССК;  $L_{\phi_k}, L_{\phi_n}$  – плечо курсового момента кормовых и носовых горизонтальных движителей соответственно. Распределение управляющих сил и моментов в ДРК осуществляется путем их декомпозиции по элементам с учетом особенностей управления в режимах крейсерского

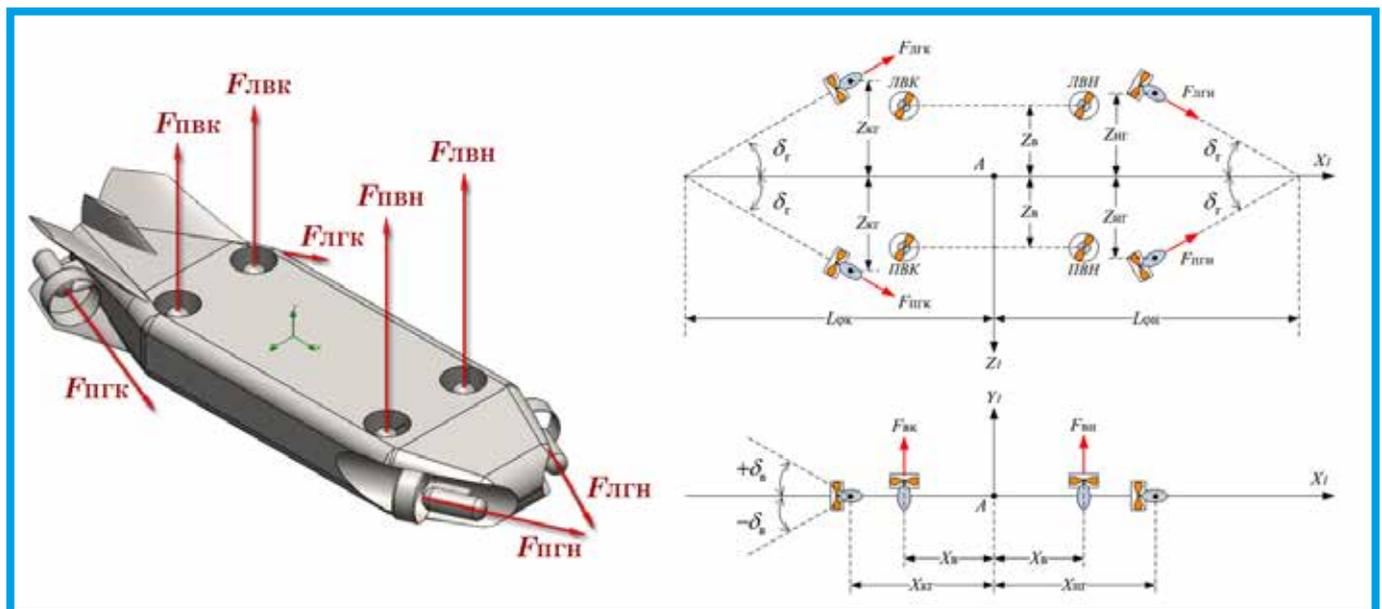


Рис. 3. Пространственная модель ГНПА и компоновочная схема ДРК

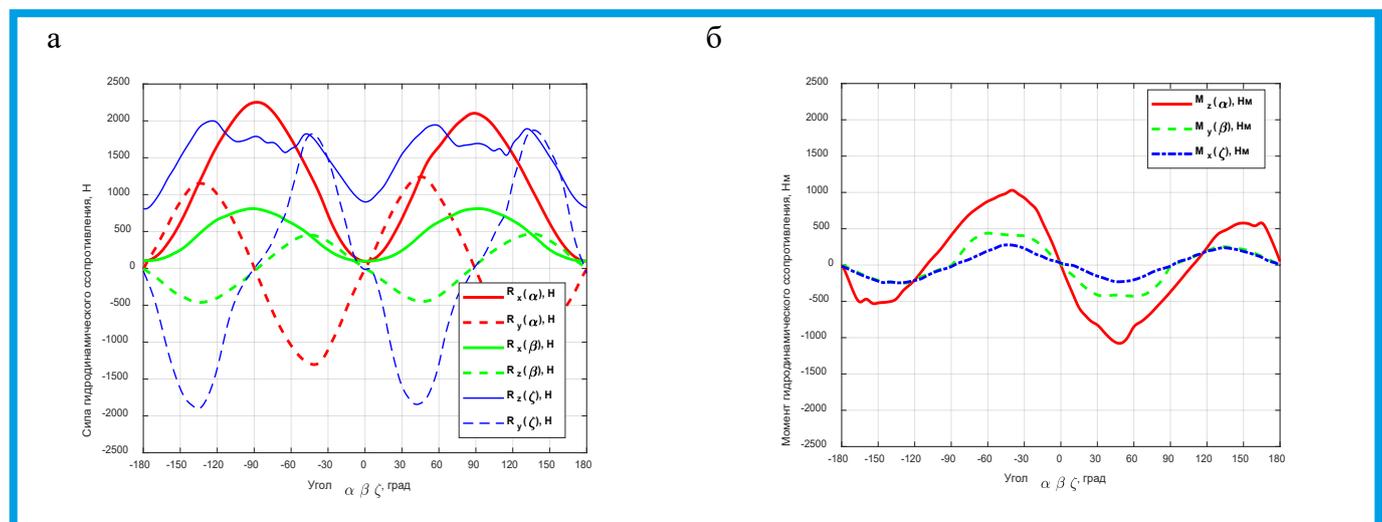


Рис. 4. Зависимости позиционных сил (а) и моментов (б) гидродинамического сопротивления

движения и динамического позиционирования вблизи инспектируемого объекта [6].

На рис. 4 приведены зависимости позиционных сил и моментов гидродинамического сопротивления от углов атаки и дрейфа в диапазоне их изменения  $\pm 180^\circ$ . Для определения демпфирующих сил и моментов измерения производились при вращении поля набегающего потока со скоростью 0,1 рад/с.

Как отмечено в работе [6], аппарат является статически устойчивым по отношению к углам атаки, крена и курса во всем диапазоне их изменения. Это соответствует смещению центра гидродинамического давления в корму аппарата относительно его центра масс. В этом случае заданные требования по устойчивости и точности управления выполняются достаточно просто с помощью адаптивного ПИД-регулятора с ограничениями на величину управляющих воздействий.

### ■ АЛГОРИТМ МАРШРУТИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ГНПА ВБЛИЗИ ДНА С ОБХОДОМ (ИНСПЕКЦИЕЙ) ЦЕЛЕЙ (ОБЪЕКТОВ)

Пусть в миссию ГНПА входит последовательный обход (инспекция)  $j \leq N$  целей (объектов), положение которых определено координатами с заданной окрестностью радиусом  $\varepsilon$ . Предполагается, что местоположение ГНПА определяется с помощью навигационного комплекса, в состав которого входят бортовая и гидроакустическая навигационные системы. При целенаправленном движении и обнару-

жении препятствия в секторе переднего обзора ЭЛС по заданному критерию оценивается его размер для выработки соответствующего управляющего воздействия. В зависимости от размера препятствия выполняется его преодоление «с ходу» либо с регулированием скорости и углового положения относительно препятствия. Для преодоления крупного препятствия необходимо совершить маневр с помощью маршевых и подруливающих движителей, входящих в состав ДРК. При достижении окрестности текущей цели (объекта) выполняется динамическое позиционирование в течение заданного промежутка времени, после чего аппарат направляется к новой цели. Цикл завершается при достижении конечной цели. Алгоритм, представленный в нотации StateFlow Simulink Matlab, приведен на рис. 5.

Алгоритм состоит из двух параллельных процессов. Первый процесс, реализованный функцией POSITIONXY(HUVmode, PointNumber, VCmode, DepthHeight), связан с маршрутизацией движения при обходе целей с заданными координатами и переключением режимов движения (Patrolling\_motion). Второй процесс заключается в коррекции движения при возникновении препятствий в секторе переднего обзора (Critical\_correction). Алгоритм коррекции реализован функцией MOVECORRECTION(ForwardSonar, LeftSonar, RightSonar).

При эквидистантном движении вблизи дна с относительно пологим рельефом формируется управление, обеспечивающее стабилизацию заданного расстояния до дна «с ходу» [2, 4]. В этом случае управляющее воздействие пропорционально линей-

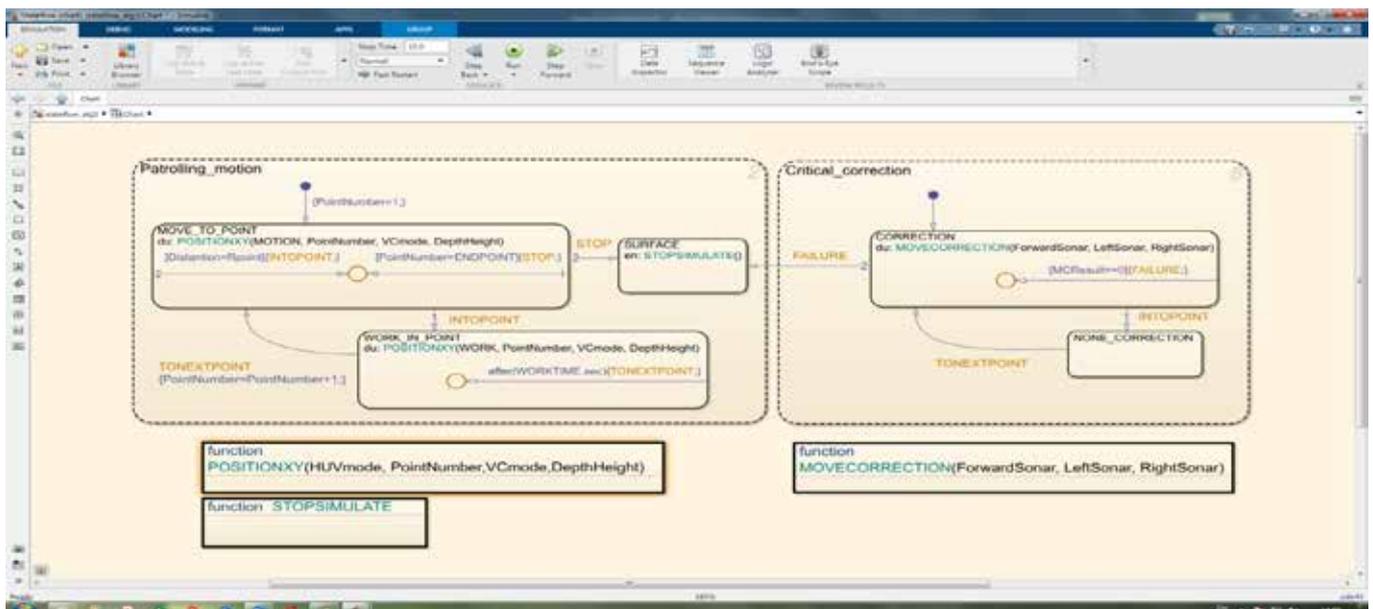


Рис. 5. Схема алгоритма патрулирования заданных целей (объектов)

ным и угловым рассогласованиям при заданных значениях стабилизируемых величин:

$$T_{y1} = K_{d1}(d_1 - d_{1s}) + K_{d2}(d_2 - d_{2s}) + K_{\theta_6}(\theta_6 - \psi),$$

$$|T_{y1}| \leq T_{y1}^{\max},$$

где  $d_{1s}, d_{2s}$  – заданные значения дистанций до дна в двух направлениях,  $K_{d1}, K_{d2}, K_{\theta_6}$  – настраиваемые параметры управления, выбором которых обеспечивается заданное качество управления,  $T_{y1}^{\max}$  – максимальная величина суммарного управляющего упора кормовых движителей, создающих максимальный управляющий (дифференцирующий) момент  $M_{z1}^{\max}$ .

Алгоритм управления при маневрировании вблизи крупного препятствия учитывает возможность огибания или обхода препятствия с регулированием скорости в зависимости от положения аппарата относительно препятствия. Для обхода препятствия в горизонтальной плоскости формируется управляющее воздействие:

– при обходе препятствия справа:

$$T_{z1} = K_{d4}(d_4 - d_{4s}) + K_{d2}(d_2 - d_{2s}) + K_{\theta_g}(\theta_{gr} - \chi),$$

$$|T_{z1}| \leq T_{z1}^{\max},$$

– при обходе препятствия слева:

$$T_{z1} = K_{d5}(d_5 - d_{5s}) + K_{d2}(d_2 - d_{2s}) + K_{\theta_g}(\theta_{gl} - \chi),$$

$$|T_{z1}| \leq T_{z1}^{\max}.$$

Измеряемая передним эхолотом дистанция  $d_3$  используется для управления скоростью движения при обнаружении достаточно высоких и крутых препятствий. Управление скоростью осуществляется путем изменения величины продольного упора:

$$T_{x1} = T_{x1}^{\max} \cdot \text{sat } d_3 / d_3^{\max},$$

где  $T_{x1}^{\max}$  соответствует заданной скорости движения,  $d_3^{\max}$  – предельному значению дальности, измеряемой передним эхолотом.

При выполнении маневра по преодолению препятствия влиянием крена на динамику переходных процессов, как показывают результаты моделирования, можно пренебречь вследствие собственной остойчивости аппарата.

## ■ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Вычислительный эксперимент с использованием реальных и модельных исходных данных дает возможность оценить динамиче-

ские свойства системы управления при осуществлении основных режимов движения при патрулировании района обследования. Как отмечено выше, для оптимизации вычислений производилось масштабирование модели динамической системы. В качестве визуализированной 3D-модели рельефа дна взято масштабированное изображение рельефа дна на основе скорректированного фрагмента батиметрической карты Татарского пролива. В соответствии с общими положениями в вычислительную модель движения ГНПА были включены следующие элементы:

- старт из заданного начального положения в координатах OXYZ с переходом на эквидистантное движение по высоте от дна (5 м) с использованием навигационных данных и данных модели ЭЛС;
- целенаправленное движение с преодолением препятствий и достижением заданных объектов (целей) в порядке их расположения;
- динамическое позиционирование (зависание) в окрестности цели № 2 с удержанием заданных параметров движения (высоты над дном, скорости, смещений относительно цели).

При моделировании динамики ГНПА были приняты параметры модели ГНПА, приведенные в [6], и следующие характеристики ЭЛС и ДРК:

- максимальная дальность действия гидролокаторов 50 м;
- заданные значения  $d_{1s} = 5$  м,  $d_{2s} = (5\sqrt{2})$  м для стабилизации эквидистанты по нижнему и наклонному эхолотам;
- заданные значения  $d_{2s} = d_{4s} = (5\sqrt{2})$  м для стабилизации эквидистанты по боковым эхолотам;
- максимальная величина тяги управляющих движителей 550Н.

Результаты моделирования представлены на рис. 6–10. На рис. 6 показан фрагмент рельефа дна в виде ракурсного изображения с нанесенной на него эквидистантной траекторией в режимах крейсерского хода и позиционирования в окрестности цели

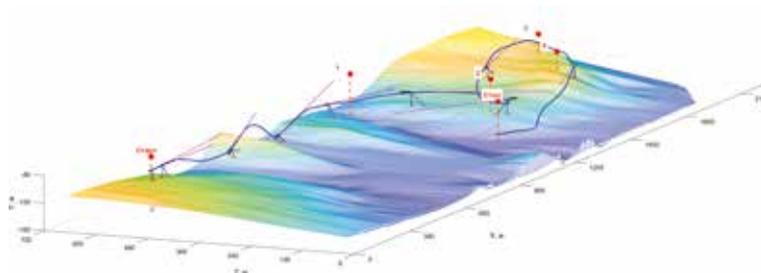


Рис. 6. Ракурсное изображение рельефа дна и эквидистантной траектории при последовательном обходе целей

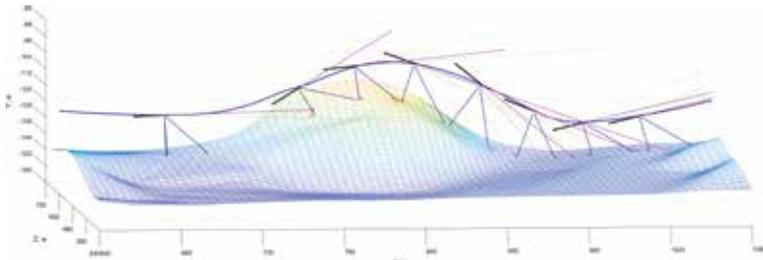
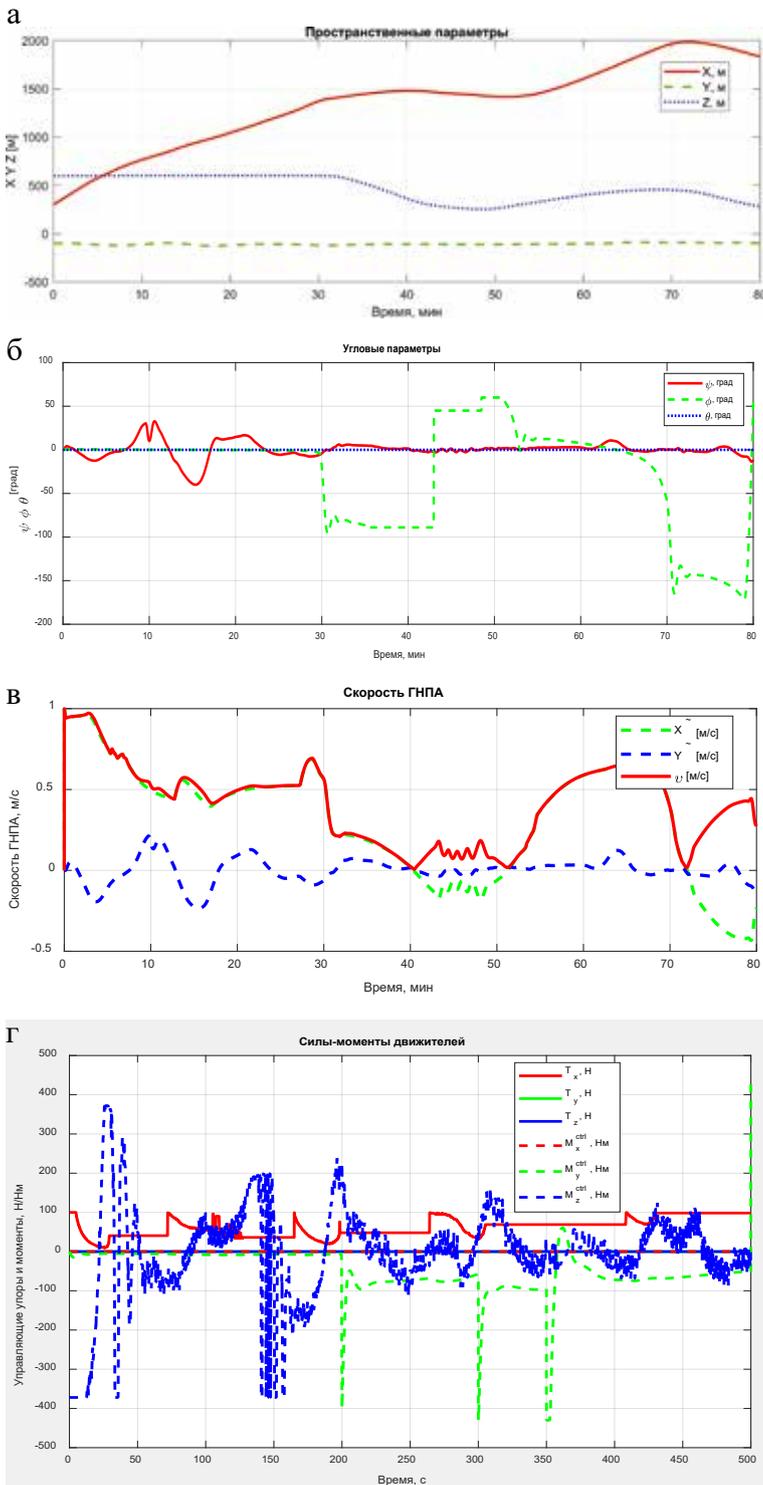


Рис. 7. Фрагмент эквидистантной траектории при обнаружении препятствия; с периодом 9б с показаны лучи эхолотера ЭЛС переднего/нижнего обзора



№ 2. В приведенном изображении выделен фрагмент с характерным рельефом дна, представленный в увеличенном виде на рис. 7. Эквидистантная траектория при обнаружении препятствия и движении вблизи него построена на основе алгоритма управления с регулированием скорости по данным эхолотационной системы. Параметры движения, соответствующие характеру рельефа дна, включая линейные и угловые величины, составляющие скорости движения и управляющие воздействия в вертикальной плоскости, приведены на (рис. 8 а, б, в, г). Для конкретности на рис. 8 представлены графики динамических процессов на временном интервале длительностью 80 мин, соответствующем начальному участку траектории как сравнительно более сложному в отношении рельефа дна и режимов управления.

При движении по эквидистанте для управления используются дальномерные данные в нижнем секторе эхолотации, а по данным переднего эхолотера определяется наличие препятствия и изменяется поступательная скорость, включая, при необходимости, торможение и задний ход. Результаты вычислений отражаются на характере изменения эхолотационных данных, из которых наиболее информативными являются показания переднего эхолотера во всем диапазоне их допустимого изменения (рис. 9).

Оценкой точности отслеживания эквидистанты относительно профиля рельефа дна может служить СКО величины рассогласования показаний нижнего эхолотера  $d_1 - d_{1s}$  при заданном значении  $d_{1s} = 5$  м. Эта величина зависит от характера изменения динамических параметров, причем наибольший вклад в ошибку, как это видно из рис. 9, вносится в процессе огибания препятствия «с ходу». Так, на интервале времени 0–10 мин СКО = 0,67 м, на интервале времени 10–20 мин, соответствующем процессу огибания препятствия, СКО = 1,39 м, а на интервале 0–90 мин СКО = 0,58 м.

При достижении цели № 2 а интервале времени 45–50 мин осуществляется динами-

Рис. 8. Изменение параметров движения на интервале времени длительностью 80 мин: а – линейные перемещения, б – угловые величины, в – скорость и ее составляющие в вертикальной плоскости, г – управляющие силы и моменты

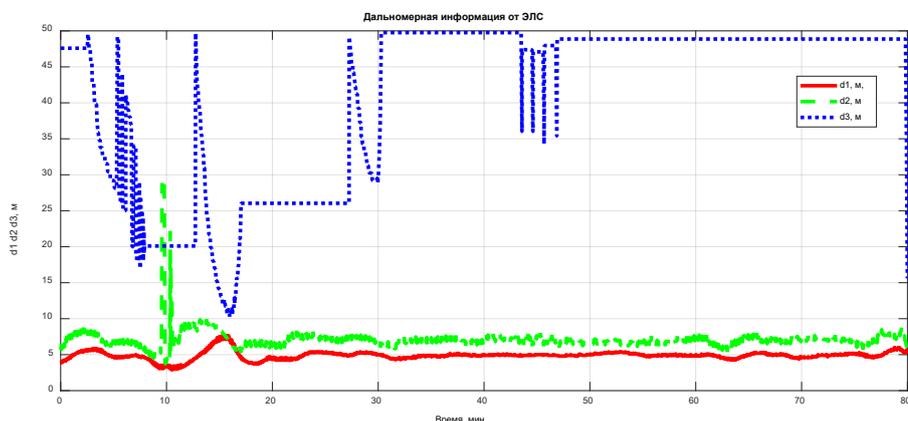


Рис. 9. Дальномерная информация при эквидистантном движении

ческое позиционирование (зависание над точкой) в окрестности цели № 2 с заданным курсом  $45^\circ$ , измеряемым относительно направления оси ОХ инерциальной системы координат. Более детально динамика аппарата в режиме позиционирования показана на рис. 10, 11.

Задача динамического позиционирования в окрестности заданной цели заключается в стабилизации продольных и лаговых перемещений аппарата относительно цели и зависании над точкой при наличии динамических ошибок и действии внешних возмущений, таких как течение или натяжение оптоволоконного кабеля связи. Как уже отмечалось, в режиме позиционирования ГНПА функционирует как ТНПА, используя для управления ДРК с подруливающими вертикальными и горизонтальными движителями. Для позиционирования используется настраиваемый регулятор перемещений относительно цели с заданными ограничениями на величину управляющих воздействий. В рассматриваемой модели для оценки динамических характеристик аппарата при позиционировании принята идеализация, что навигационные данные, используемые для управления, не содержат ошибок. Реально бортовая навигационная информация, содержащая определенные ошибки, используется главным образом для наведения на цель, а при стабилизации движения вблизи цели (объекта) обычно используются более точные гидролокационные и видеоданные.

Учтем характер случайных ошибок  $(\delta X = \tilde{X} - X, \delta Z = \tilde{Z} - Z)$  определения текущих координат аппарата в виде нормального закона распределения с нулевым средним значением и СКО, составляющим 0,1 от текущей дистанции до цели:

$$(\delta X, \delta Z) = \mu \cdot \Delta R \cdot \text{normrnd}(0,1),$$

$$\Delta R = (\Delta X^2 + \Delta Z^2)^{1/2},$$

где  $(\Delta X, \Delta Z)$  – разности между координатами аппарата и цели,  $\mu = 0,15$  – параметр масштабирования величины ошибки.

На рис. 10 приведен пример траектории позиционирования в окрестности цели радиусом  $R = 10$  м с регулированием скорости и стабилизацией курса  $45^\circ$  (показано тонкими линиями). Поскольку вертикальная координата при позиционировании

стабилизируется с достаточно высокой точностью, траектория показана в проекции на горизонтальную плоскость с учетом влияния крена и дифферента аппарата при взаимодействии управляющих сил в трех плоскостях. Начальный участок траектории соответствует вхождению в заданную окрестность цели, после чего осуществляются сближение с целью и «зависание над точкой» в течение 5 мин с переходом в режим движения к следующей цели.

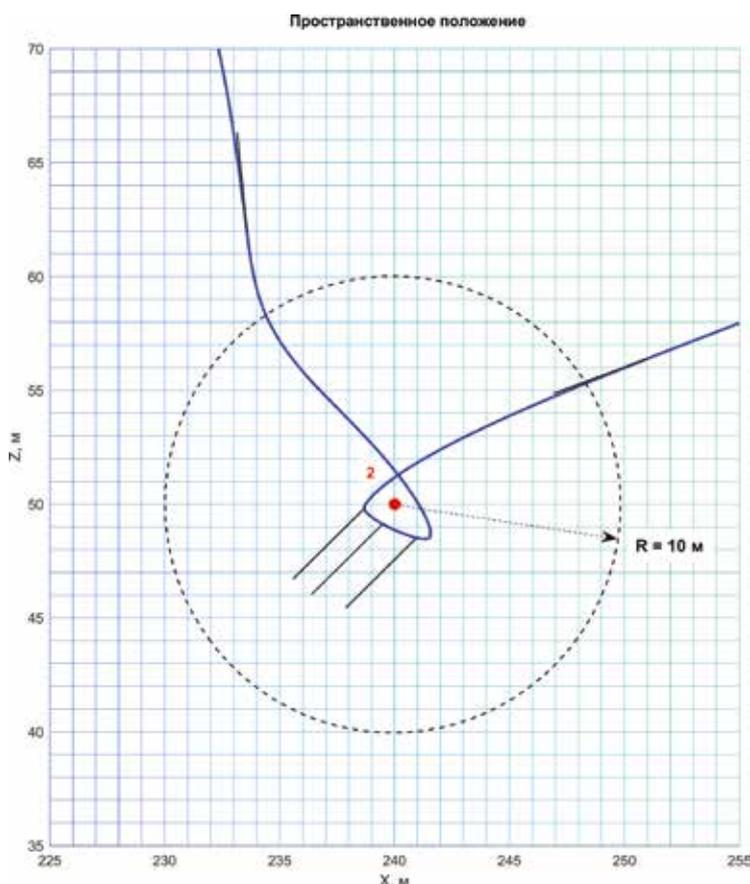


Рис. 10. Траектория позиционирования в окрестности заданной цели

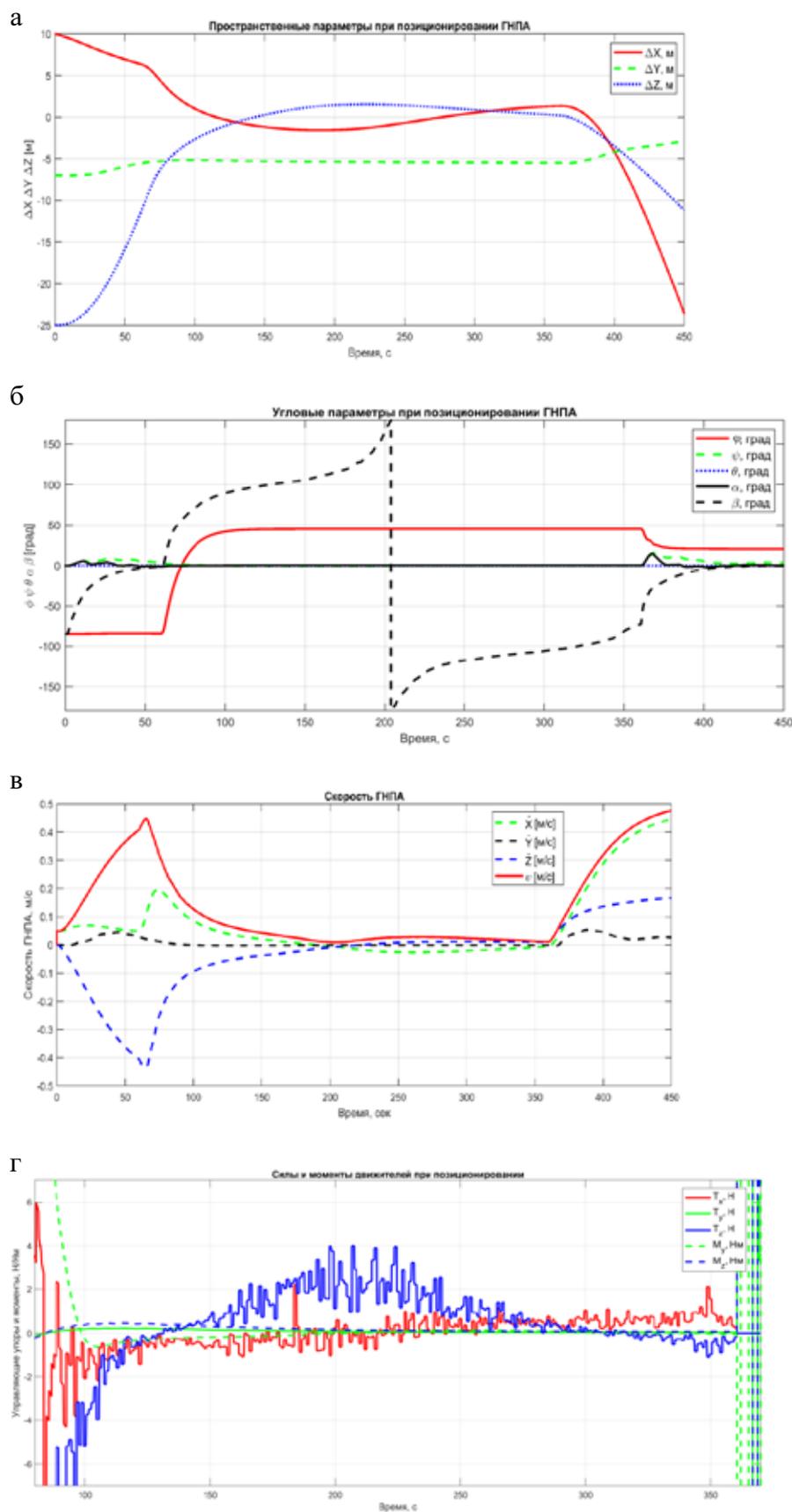


Рис. 11. Параметры динамического позиционирования: а – позиционные рассогласования относительно цели, б – угловые параметры, в – составляющие скорости движения, г – управляющие воздействия (силы и моменты)

Соответствующие данной траектории параметры движения (линейные и угловые величины, составляющие скорости движения в горизонтальной плоскости, управляющие воздействия приведены на рис. 11 а, б, в, г. Режиму позиционирования в окрестности цели соответствует интервал времени (50–350) с.

Из приведенных иллюстраций видно, что в режиме позиционирования с использованием системы подруливающих двигателей совершаются продольно-поперечные перемещения аппарата с малой скоростью при соответствующем изменении сил вязкого сопротивления и управляющих воздействий.

### Заключение

В работе рассмотрен ряд вопросов, связанных с применением ГНПА для патрулирования морских акваторий по целенаправленным эквидистантным траекториям вблизи дна. Основу исследования составляет 3D-модель системы управления движением, позволяющая строить визуализированные сценарии динамических процессов при выполнении поисково-обследовательских миссий в заданной области расположения инспектируемых объектов. Как следует из результатов вычислительного эксперимента с использованием исходных данных прототипа ГНПА, система управления движением обеспечивает устойчивое целенаправленное движение по эквидистантной траектории в крейсерском режиме с преодолением препятствий и динамическое позиционирование в малой окрестности заданной цели (инспектируемого объекта). Приведенные в работе модельные процессы получены для примера рельефа дна, восстановленного по фрагменту батиметрической карты

Татарского пролива. В развитие работы представляется актуальным экстраполировать исходные данные модели на решение задач, связанных с применением ГНПА для обследования морских акваторий в условиях более сложного рельефа дна, в стесненном пространстве, ледовом покрытии, рабочих миссий по обслуживанию подводных инфраструктур.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Матвиенко Ю.В., Костенко В.В., Щербатюк А.Ф., Ремезков А.В. Развитие технологического потенциала автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4(34). С. 4–14.
2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М: Наука, 2005. 400 с.
3. 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.
4. Киселев Л.В., Медведев А.В. О некоторых особенностях динамики автономного подводного робота при управлении эквидистантным движением вблизи дна // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27, № 1 (104). С. 93–106.
5. 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.
6. Киселев, Л.В. Костенко В.В., Медведев А.В. Особенности динамической модели пространственного движения гибридного необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 1(35). С. 18–30.
7. Агеев М.Д., Инзарцев А.В., Киселев Л.В. Некоторые вопросы управления АНПА при обследовании подводных гор // Морские технологии. Вып.3. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 46–55.
8. Inzartsev A.V, Kiselev L.V, Medvedev A.V, Pavin A.M. Autonomous Underwater Vehicle Motion Control during Investigation Bottom Objects and Hard-to-Reach Areas // Motion Control. Vienna, Austria, 2010. P. 207–228.
9. Инзарцев А.В., Каморный А.В., Львов О.Ю. и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2(4). С. 5–14.
10. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Навигационный комплекс автономного подводного робота и особенности его применения в условиях Арктики // Подводные исследования и робототехника. 2008. № 1(5). С. 24–31.
11. Inzartsev A.V., Kiseljev L.V., Matviyenko Yu.V. et al. Integrated Positioning System of Autonomous Underwater Robot and Its Application in High Latitudes of Arctic Zone // Gyroscopy and Navigation. 2010. V. 1, No. 2. P. 107–112.
12. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973. 209 с.
13. Ястребов В.С., Игнатъев М.Б., Кулаков Ф.М., Михайлов В.В. Подводные роботы. Л.: Судостроение, 1977. 363 с.
14. Dehghan A.A., Dehghan Manshadi M., Experimental investigation of hydrodynamic characteristics of a submersible vehicle model with anon-axisymmetric nose in pitch maneuver // Ocean Engineering. 2015. V. 100. P. 26–34.
15. Geisbert, J.S., Hydrodynamic Modeling for Autonomous Underwater Vehicles Using Computational and Semi-Empirical Methods. Blacksburg, Virginia, 2007. 87 p.
16. 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.
17. An Autonomous Underwater Vehicle using Remote Piloting Technology via 4G Internet. – URL: <https://www.sut.org/wp-content/uploads/2018/06/Aaron-Leather-v2-AUT-Freedom-Rev3-Final-Submission-draft-2-21.10.2019.pdf> (дата обращения: 03.07.2021).

### Об авторах

**Киселев Лев Владимирович**, д.т.н., главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института 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., заведующий лабораторией исполнительных устройств и систем телеуправления, ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института 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** – старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института 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

### Для цитирования:

Киселев Л.В., Костенко В.В., Медведев А.В. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ И ДИНАМИКА ГИБРИДНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ ПАТРУЛИРОВАНИИ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ ПО ЭКВИДИСТАНТНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ В СЛОЖНОМ РЕЛЬЕФЕ ДНА // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 3(37). С. 46–58. DOI: 10.37102/1992-4429\_2021\_37\_03\_05.