

# ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ГИБРИДНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

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

При создании гибридных автономных необитаемых подводных аппаратов (ГНПА) одна из основных проблем состоит в обеспечении заданных динамических свойств аппарата с учетом особенностей его конструкции и многообразия режимов пространственного движения. Для решения этой актуальной проблемы разрабатывается динамическая модель, основанная на совмещении функций автономного и телеуправляемого подводных аппаратов (АНПА/ТНПА). Основными элементами в структуре модели являются: математическая модель пространственного движения с шестью степенями свободы, вычислительные средства «виртуальной гидродинамики», адаптивные регуляторы движения, комбинированный движительно-рулевой комплекс, модель внешней среды. Задача исследования состоит в определении параметров математической модели (гидродинамических характеристик, управляющих и возмущающих сил, сил гидродинамического сопротивления, ходовых и маневренных характеристик аппарата) в режимах крейсерского движения и позиционирования. В качестве прототипа ГНПА для выбора геометрической формы и основных конструктивных параметров в работе принят ГНПА «Freedom ROV» (Oceanering, США). В результате вычислительных экспериментов получены оценки параметров динамической модели ГНПА, свидетельствующие о его работоспособности при осуществлении сложных режимов пространственного движения с взаимодействием элементов всего функционального комплекса. Как следствие это позволяет выработать рекомендации для оптимального выбора структуры и характеристик многозадачной информационно-управляющей системы ГНПА при выполнении широкого класса подводно-технических работ.

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

## Введение

Развитие современных подводных робототехнических комплексов связано с разработкой гибридных необитаемых подводных аппаратов (ГНПА), создание которых основано на расширении функций АНПА путем включения в его информационно-управляющую структуру функций, присущих ТНПА. В работе [1] показано, что такой гибридный аппарат может в режиме АНПА выполнять весь спектр бесконтактных работ, выходить к заданному объекту в соответствии с заданной программой, выполнять действия, связанные с формированием канала информационного обмена с постом управления и далее выполнять контактные операции в супервизорном режиме.

В технологии ГНПА и оценке его функциональных свойств можно отметить два аспекта. Первый касается обоснования облика ГНПА, его конструктивных особенностей, системной организации, эффективности при выполнении рабочих действий. Принципиально важные задачи технологии ГНПА рассмотрены в работе [1]. К их числу относятся:

- интеллектуализация системы бортового управления,
- организация супервизорного управления АНПА,
- расширение инструментального оснащения и оптимизация конструктивных решений,
- развитие средств подводной навигации для поддержки работ ГНПА,
- организация структуры подводного базирования для обеспечения длительных работ.

Другой аспект проблемы связан с построением обобщенной функционально-параметрической модели, адекватно отражающей динамические процессы ГНПА в многозадачных режимах пространственного движения.

В перечень основных задач по оценке функциональных и динамических характеристик системы управления пространственным движением ГНПА входит построение математической модели пространственного движения ГНПА и соответствующих вычислительных программных средств с учетом:

- особенностей решаемых задач по назначению,
- влияния переменного гидродинамического воздействия вязкой среды при осуществлении типовых и специфических режимов пространственных движений ГНПА,
- функциональных и кинематических особенностей движительно-рулевого комплекса (ДРК), обеспечивающего эффективное маневрирование ГНПА в пространстве, в том числе в толще воды и вблизи дна,
- минимизации энергозатрат на движение в условиях повышенной автономности,
- объема и точностных характеристик навигационных данных, необходимых для формирования миссий и управления движением с многообразием программных и самоорганизующихся траекторий.

Для решения указанного класса задач необходима разработка алгоритмов и средств имитационного моделирования, обеспечивающих адекватность используемой математической модели, надежную идентификацию гидродинамических характеристик аппарата, силовых и энергетических характеристик ДРК в режимах автономного и телеуправляемого движения.

### ■ Структура управления и режимы движения

Динамические свойства ГНПА, как и АНПА вообще, определяются характеристиками управляемости (маневренности), устойчивости по отношению к начальным условиям вектора состояний и по отношению к параметрам управления, точности и быстродействия в переходных и установившихся режимах.

Перечень основных режимов движения определяется характером выполняемых работ и соответствующих им миссиям. В общем случае в этот перечень включаются:

- 1) поступательное движение с постоянной или переменной скоростью, торможение, задний ход,
- 2) движение в вертикальной плоскости с управлением глубиной погружения или расстоянием до дна,
- 3) зависание, вертикальное погружение/всплытие с постоянной или регулируемой плавучестью,

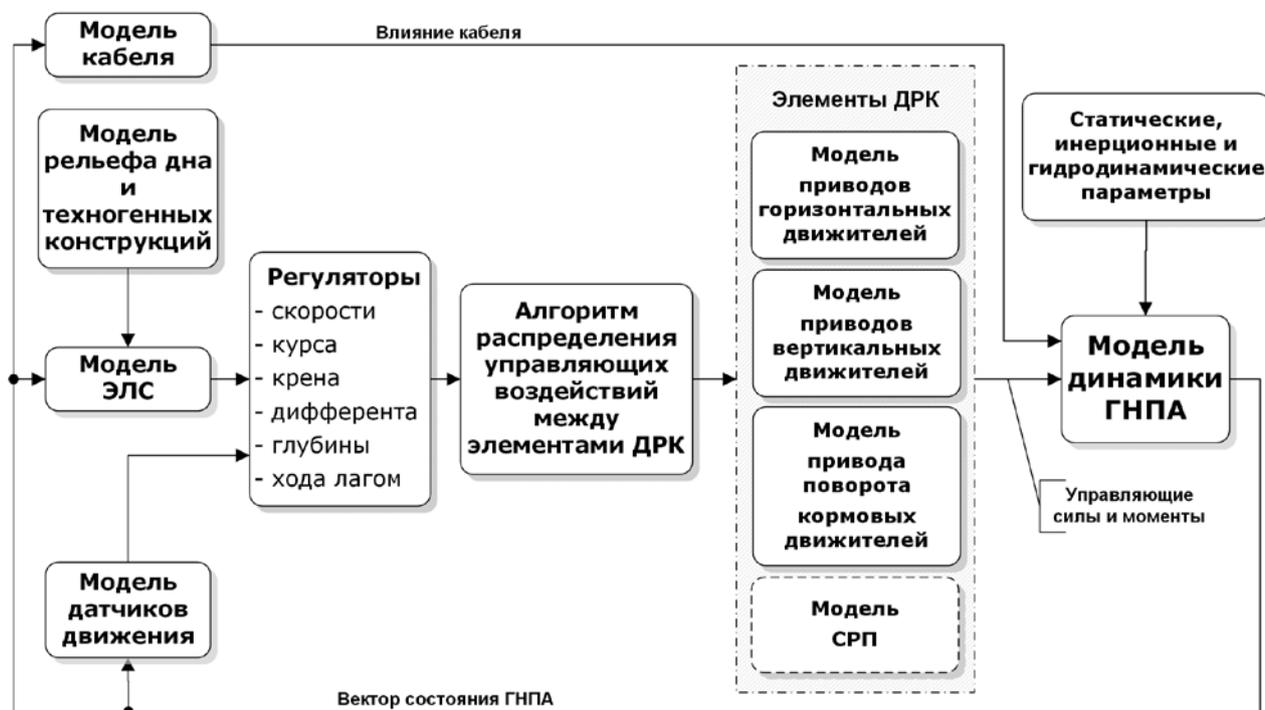


Рис. 1. Структурная схема модели СУ ГНПА

4) круговые или иные вращательные движения в горизонтальной плоскости в режимах «ход» и «на месте» (циркуляция), стабилизация курса или угловой скорости,

5) динамическое позиционирование над точкой (объектом), стабилизация линейного и углового положения в трех плоскостях.

Все перечисленные режимы движения являются, в принципе, типовыми для АНПА и ТНПА. Из них наиболее сложным в отношении динамики является режим позиционирования, который сопровождается стабилизацией положения по линейным и угловым координатам, лаговыми движениями с малой скоростью и стабилизацией углового положения с ориентацией на заданное направление.

Реализация перечисленных режимов движения предполагает использование исполнительных органов, представляющих собой пространственно распределенный избыточный движительно-рулевой комплекс, в состав которого включаются:

- кормовые (маршевые) движители на поворотной платформе,
- два горизонтальных подруливающих движителя, расположенные в носу ГНПА, и четыре вертикальных подруливающих движителя,
- как дополнение могут быть использованы носовые и кормовые рули, выполненные по определенной схеме.

На рис. 1 приведена структура системы управления движением ГНПА, представленная в виде двух уровней, из которых первый составляет полный состав регуляторов по каналам управления, а второй содержит модели динамики аппарата и исполнительных органов.

### ■ Математическая модель динамики ГНПА

Пространственное движение ГНПА во всех типовых режимах представляется в виде совокупности плоских движений, кинематическая взаимосвязь которых осуществляется только через управляющие и возмущающие воздействия. Это обстоятельство используется практически в системах управления движением АНПА и ТНПА и дает, кроме того, возможность представить математическую модель движения ГНПА в виде совокупности трех плоских движений, которые могут согласованно осуществляться в соответствии с программной миссией или по команде через канал связи. С учетом принятых допущений представим математическую модель пространственного движения АНПА в виде трех систем уравнений в связанной с аппаратом системе координат с использованием «естественных» переменных состояния [2-7]. Принятые при этом системы координат и схемы действия сил приведены на рис. 2.

$$\begin{aligned}
 m_x \dot{v} &= -R_x(v, \alpha) + P \sin \vartheta + (T_{x1} - F_x) \cos \alpha - (T_{y1} - F_y) \sin \alpha, \\
 m_y v \dot{\vartheta} &= R_y(v, \alpha, \psi) + P \cos \vartheta + (T_{y1} - F_y) \cos \alpha + (T_{x1} - F_x) \sin \alpha, \\
 J_{zz} \ddot{\psi} &= M_0 \sin \psi + M_z(v, \alpha, \psi) + M_{z1}, \\
 \dot{X} &= v \cos \vartheta, \quad \dot{Y} = -v \sin \vartheta, \quad \psi = \vartheta - \alpha, \\
 m_x \dot{v} &= -R_x(v, \beta) + (T_{x1} - F_x) \cos \beta - (T_{z1} - F_z) \sin \beta, \\
 m_z v \dot{\chi} &= R_z(v, \beta, \phi) + (T_{z1} - F_z) \cos \beta + (T_{x1} - F_x) \sin \beta, \\
 J_{yy} \ddot{\phi} &= M_y(v, \beta, \phi) + M_{y1}, \\
 \dot{X} &= v \cos \chi, \quad \dot{Z} = v \sin \chi, \quad \phi = \chi + \beta, \\
 m_z \dot{v} &= -R_z(v, \zeta) + P \sin \kappa + (T_{z1} - F_z) \cos \zeta - (T_{y1} - F_y) \sin \zeta, \\
 m_y v \dot{\kappa} &= R_y(v, \zeta, \theta) + P \cos \kappa + (T_{y1} - F_y) \cos \zeta + (T_{z1} - F_z) \sin \zeta, \\
 J_{xx} \ddot{\theta} &= M_0 \sin \theta + M_x(v, \zeta, \theta) + M_{x1}, \\
 \dot{Z} &= v \cos \kappa, \quad \dot{Y} = -v \sin \kappa, \quad \theta = \kappa - \zeta.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

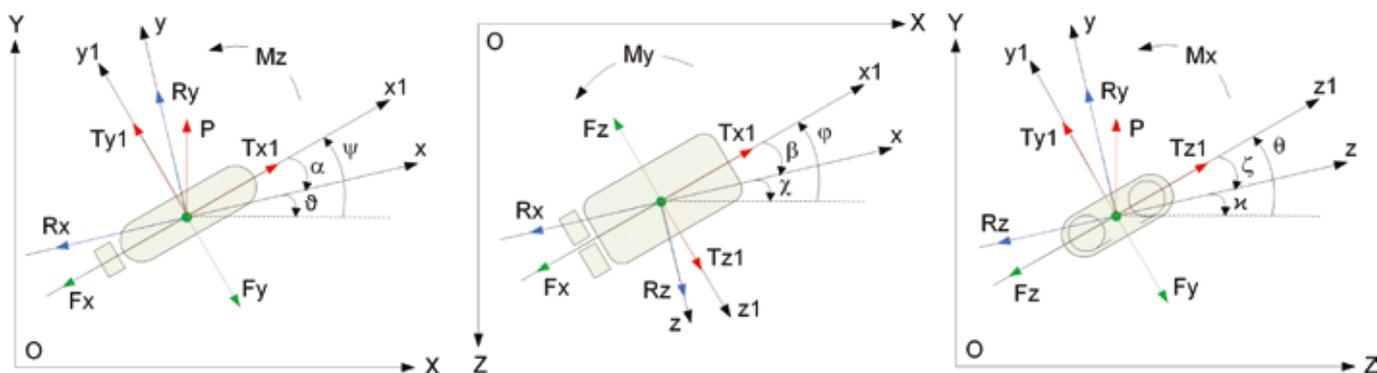


Рис. 2. Схема действия сил в связанной системе координат для модели ГНПА

В уравнениях (1) используются обозначения, принятые в работах [1–4], в частности: OXYZ – инерциальная (полигонная 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  $v$ ;  $m_x, m_y, m_z, J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}$  – 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;  $F_x, F_y, F_z$  – проекции результирующей силовой воздействия кабеля связи на оси связанной системы координат;  $M_0 = \gamma V_a h_o$  – момент остойчивости;  $\gamma$  – удельный вес жидкости;  $V_a$  – объемное водоизмещение аппарата;  $h_o$  – метацентрическая высота;  $P = \gamma V_a - G_a$  – остаточная плавучесть аппарата, где  $G_a$  – вес аппарата на воздухе.

Гидродинамические силы и моменты, обусловленные вязкостью жидкости, принято представлять в виде суммы позиционных и демпфирующих составляющих [2, 3]:

$$\begin{aligned}
 R_x(v, \alpha) &= C_x(\alpha) \frac{\rho v^2}{2} V^{2/3} = R_x(1, \alpha) v^2; \\
 R_y(v, \alpha, \psi) &= C_y(\alpha) \frac{\rho v^2}{2} V^{2/3} + C_y^\omega \frac{\rho v}{2} V \dot{\psi} = R_y(1, \alpha) v^2 + C_y^\omega \frac{\rho v}{2} V \dot{\psi}; \\
 R_z(v, \beta, \phi) &= C_z(\beta) \frac{\rho v^2}{2} V^{2/3} + C_z^\omega \frac{\rho v}{2} V \dot{\phi} = R_z(1, \beta) v^2 + C_z^\omega \frac{\rho v}{2} V \dot{\phi}; \\
 M_x(v, \zeta, \theta) &= m_x(\zeta) \frac{\rho v^2}{2} V + C_x^\omega \frac{\rho v}{2} V^{4/3} \dot{\theta} = M_x(1, \zeta) v^2 + m_x^\omega \frac{\rho v}{2} V^{4/3} \dot{\theta}; \\
 M_y(v, \beta, \phi) &= m_y(\beta) \frac{\rho v^2}{2} V + C_y^\omega \frac{\rho v}{2} V^{4/3} \dot{\phi} = M_y(1, \beta) v^2 + m_y^\omega \frac{\rho v}{2} V^{4/3} \dot{\phi}; \\
 M_z(v, \alpha, \psi) &= m_z(\alpha) \frac{\rho v^2}{2} V + C_z^\omega \frac{\rho v}{2} V^{4/3} \dot{\psi} = M_z(1, \alpha) v^2 + m_z^\omega \frac{\rho v}{2} V^{4/3} \dot{\psi};
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $R_x(1, \alpha), R_y(1, \alpha), R_z(1, \beta), M_x(1, \zeta), M_y(1, \beta), M_z(1, \alpha)$ , – зависимости позиционной составляющей гидродинамических сил и моментов от углов атаки, дрейфа и скольжения при скорости набегающего потока  $v = 1$  м/с;  $C_x^\omega, C_y^\omega, C_z^\omega, m_x^\omega, m_y^\omega, m_z^\omega$  – демпфирующие коэффициенты.

Для конкретного примера ГНПА в качестве аналога для дальнейших вычислительных экспериментов был принят ГНПА «Freedom ROV» (Oceanering, США), внешний вид которого и 3D-изображение модели показаны на рис. 3.

Параметры модели, представленной в виде трехосного эллипсоида, приведены в табл. 1, причем составляющие масс и моментов инерции с учетом присоединенной жидкости вычислялись по известным формулам гидродинамики [4].

Для определения гидродинамических характеристик модели использовались прикладные программные средства «виртуальной



Рис. 3. Внешний вид ГНПА «Freedom ROV» и 3D-изображение его модели

Таблица 1. Параметры модели ГНПА

Параметры	Значение
Размеры: длина; ширина; высота, м	4,0; 0,5; 0,8
Объём,	1,79
Площадь поверхности,	21,05
Метацентрическая высота, мм	5
Момент остойчивости, Нм	92
Масса: $m_x, m_y, m_z$ кг	2402 , 4144, 4144
Моменты инерции: $J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}$ кг·м <sup>2</sup>	405, 4691, 4691

продувки», позволяющие строить визуализированные картины обтекания тела в поле набегающего потока [5,6]. 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 модель аппарата вращалась относительно центра масс со скоростью 0,1 рад/с. В результате вычислений с использованием САПР «Solid Works» были получены следующие абсолютные значения для производных этих величин:

$$\begin{aligned}
 R_y^\omega &= 19 \text{ Н}; R_z^\omega = 1,8 \text{ Н}; M_x^\omega = 1,3 \text{ Нм}; \\
 M_y^\omega &= 30,3 \text{ Нм}; M_z^\omega = 87 \text{ Нм}.
 \end{aligned}$$

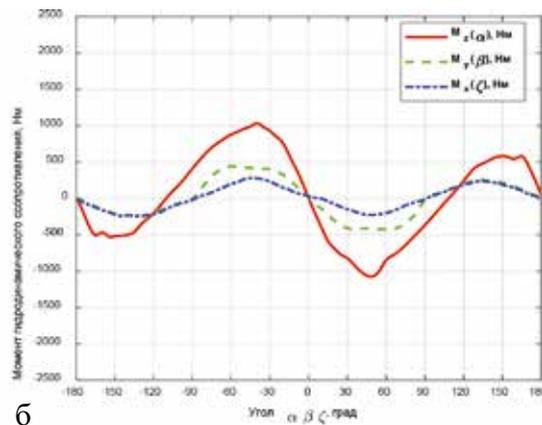
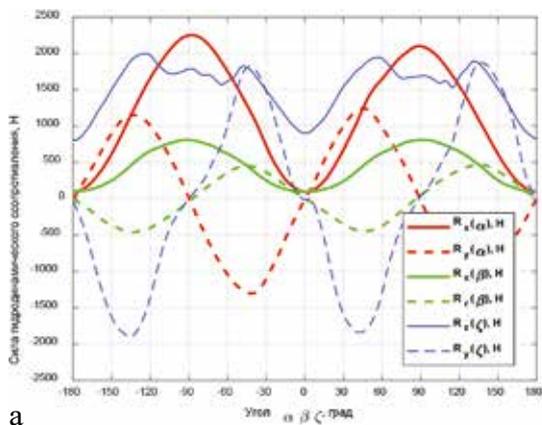


Рис. 4. Зависимости позиционных сил (а) и моментов (б) гидродинамического сопротивления

Следует отметить, что составляющие гидродинамического момента являются знакопеременными величинами и меняют знак при углах атаки, крена и дрейфа вблизи  $0^\circ, \pm 120^\circ$ . Из графиков следует, что аппарат статически устойчив по углам атаки, крена и курса во всем диапазоне их изменения. Это соответствует положению центра гидродинамического давления в корму аппарата относительно его центра масс. В противном случае это может повлечь за собой статическую неустойчивость аппарата, главным образом по углу атаки, и необходимость использования эффективных алгоритмов управления движением в вертикальной плоскости для обеспечения устойчивости движения «в большом» и «в малом».

### ■ Вычислительная модель

Разработанный стенд моделирования в *Matlab/Simulink*-диаграмме позволяет в ручном и автоматическом режимах управлять моделью ГНПА. Ручной режим предполагает использование контроллера *gamepad* для задания целевых значений управления в бесконечном по времени запуске моделирования. При этом используется модуль «*RealTime Sync*» для синхронизации с реальным временем. Автоматический режим предполагает отработку заданных алгоритмов движения при ограниченном времени на симуляцию, при этом не требуется синхронизация с реальными часами. Данный режим позволяет также управлять

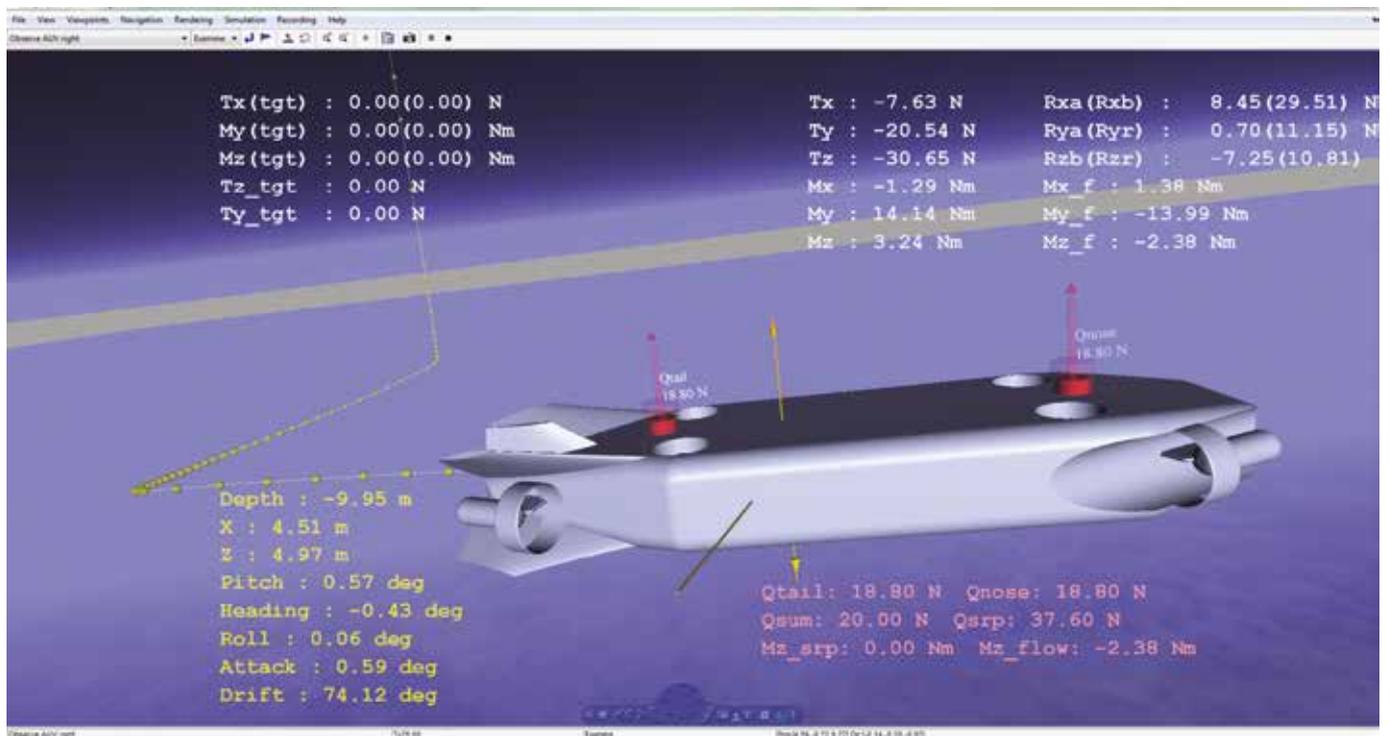
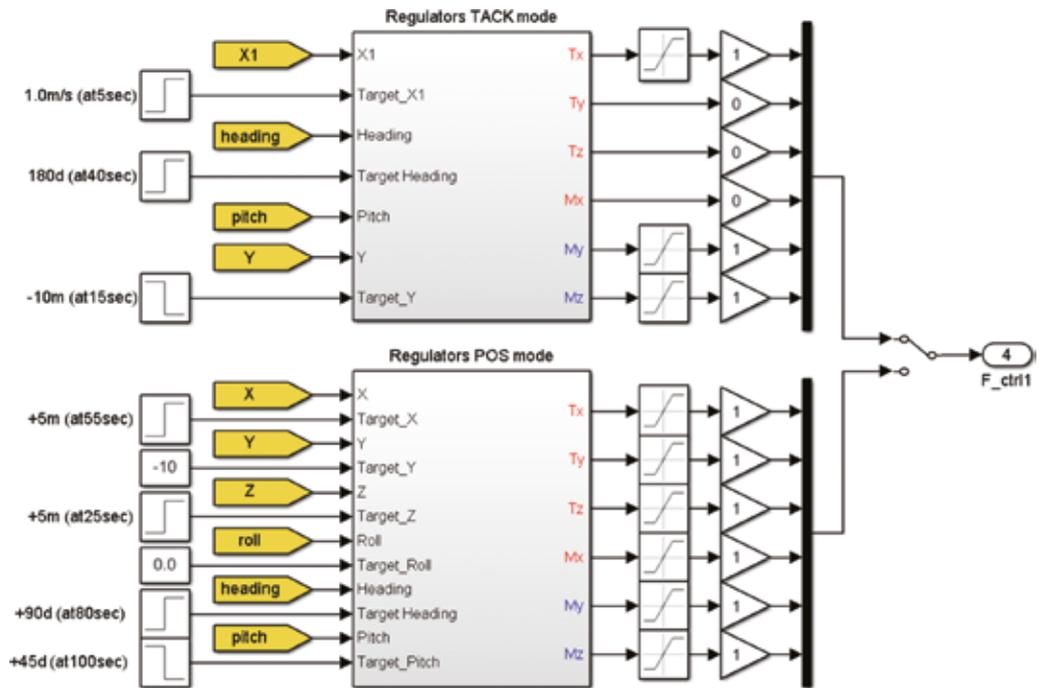


Рис. 5. Окно для визуального отображения поведения модели ГНПА в среде с числовыми параметрами движения. В процессе ручного управления моделью через это окно возможно контролировать целевые параметры

Рис. 6. Модули Simulink. Блоки регуляторов для режимов крейсерского движения и позиционирования



системой регулирования плавучести (СПП) с алгоритмом поведения на основе блока StateFlow.

На рис. 5 приведено окно *VR-инструментария Simulink* для визуализированного представления процессов управления движением. Стенд моделирования состоит из модулей разной степени вложенности, из которых основным является блок динамики с решателями уравнений движения, с моделью гидродинамики и моделью поведения ГНПА на поверхности.

На рис. 6 представлены модули Simulink с блоками регуляторов для режимов крейсерского движения и динамического позиционирования. Дополнительные модули *Simulink* включают регуляторы управления посредством СПП и модуль контроллера для ручного управления. В каждом канале управления используются PD/PID-регуляторы с ограничениями на управляющие воздействия и параметры 6-мерного вектора состояния.

■ **Модель динамики движительно-рулевого комплекса (ДРК)**

ДРК обеспечивает работу ГНПА как в автономном режиме при выполнении обзорно-поисковых работ, так и в режиме супервизорного управления через кабель связи при динамическом позиционировании над объектом. Рулевые устройства, использующие гидродинамические крылья в качестве исполнительных органов, как известно, имеют низкую

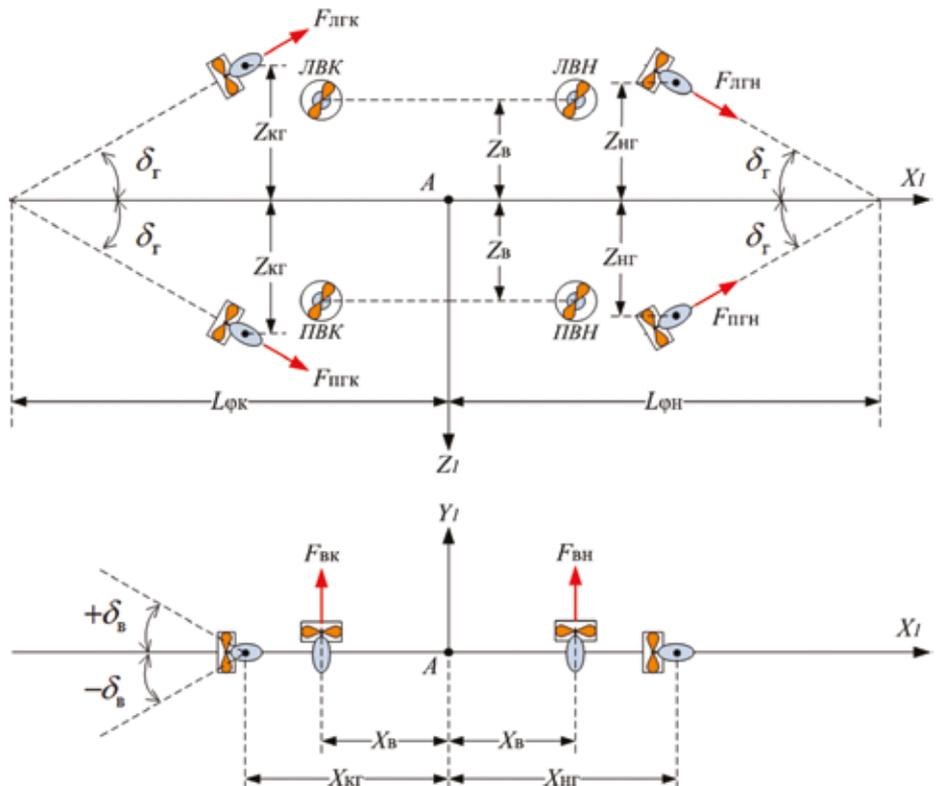


Рис. 7. Компонентная схема ДРК

эффективность при малых скоростях набегающего потока [8]. Эффективность вертикальных подруливающих движителей также может быть недостаточной из-за влияния поперечного набегающего потока [9]. При этом компромиссным решением является использование кормовых маршевых движителей с приводом поворота в вертикальной плоскости, обеспечивающим управление по дифференту во всем диапазоне скоростей хода [10]. На рис. 7 представлена компоновочная схема ДРК, создающего управляющие воздействия по всем степеням свободы аппарата.

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

$$\begin{aligned}
 T_x &= [(F_{\text{пгк}} + F_{\text{лгк}}) \cdot \cos \delta_B + F_{\text{лгн}} + F_{\text{пгн}}] \cdot \cos \delta_\Gamma, \\
 T_y &= (F_{\text{пгк}} + F_{\text{лгк}}) \cdot \sin \delta_B \cdot \cos \delta_\Gamma + F_{\text{пвк}} + F_{\text{лвк}} + F_{\text{лвн}} + F_{\text{пвн}}, \\
 T_z &= (F_{\text{пгк}} - F_{\text{лгк}} + F_{\text{лгн}} - F_{\text{пгн}}) \cdot \sin \delta_\Gamma, \\
 M_x &= (-F_{\text{пгк}} + F_{\text{лгк}}) \cdot \sin \delta_B \cdot \cos \delta_\Gamma \cdot Z_{\text{кг}} + (-F_{\text{пвк}} + F_{\text{лвк}} + F_{\text{лвн}} - F_{\text{пвн}}) \cdot Z_B, \\
 M_y &= (F_{\text{пгк}} - F_{\text{лгк}}) \cdot \sin \delta_\Gamma \cdot L_{\varphi\text{к}} + (-F_{\text{лгн}} + F_{\text{пгн}}) \cdot \sin \delta_\Gamma \cdot L_{\varphi\text{н}}, \\
 M_z &= (F_{\text{пгк}} + F_{\text{лгк}}) \cdot \sin \delta_B \cdot \cos \delta_\Gamma \cdot X_{\text{кг}} + (-F_{\text{пвк}} - F_{\text{лвк}} + F_{\text{лвн}} + F_{\text{пвн}}) \cdot X_B, \\
 L_{\varphi\text{к}} &= X_{\text{кг}} + Z_{\text{кг}} \cdot \text{ctg} \delta_\Gamma, \quad L_{\varphi\text{н}} = X_{\text{кн}} + Z_{\text{кн}} \cdot \text{ctg} \delta_\Gamma,
 \end{aligned}$$

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)  $AX_1Y_1Z_1$ ;  $F_{\text{пгк}}, F_{\text{лгк}}, F_{\text{лгн}}, F_{\text{пгн}}$  – тяги горизонтальной группы движителей;  $F_{\text{пвк}}, F_{\text{лвк}}, F_{\text{лвн}}, F_{\text{пвн}}$  – тяги вертикальной группы движителей;  $\delta_\Gamma$  – угол установки горизонтальных движителей к продольной оси аппарата  $AX_1$ ;  $|\delta_B| \leq \delta_B^{\text{max}} = 30^\circ$  – регулируемый угол поворота кормовой пары горизонтальных движителей;  $X_{\text{кг}}, Z_{\text{кг}}, X_{\text{кн}}, Z_{\text{кн}}$  – координаты расстановки горизонтальных движителей в ССК;  $X_B, Z_B$  – координаты расстановки вертикальных движителей в ССК;  $L_{\varphi\text{к}}, L_{\varphi\text{н}}$  – плечо курсового момента кормовых и носовых горизонтальных движителей, соответственно.

Численные значения линейных параметров ДРК в связанной системе координат приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры расстановки движителей ГНПА

$X_{\text{кг}}, \text{м}$	$X_{\text{пн}}, \text{м}$	$X_B, \text{м}$	$Z_{\text{кг}}, \text{м}$	$Z_{\text{пн}}, \text{м}$	$Z_B, \text{м}$	$L_{\varphi\text{к}}, \text{м}$	$L_{\varphi\text{н}}, \text{м}$	$\delta_\Gamma, \text{град}$
2,00	1,64	0,93	0,40	0,43	0,36	2,97	2,68	22,5

Декомпозиция управляющих воздействий  $T_x, M_y, M_z$  между элементами ДРК в режиме движения с крейсерским ходом (без использования вертикальной группы движителей) соответствует следующим выражениям:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{пгк}} &= T_{x1}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_\Gamma \cdot \cos \delta_B)^{-1} + M_{y1}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_\Gamma \cdot L_{\varphi\text{к}}), \\
 F_{\text{лгк}} &= T_{x1}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_\Gamma \cdot \cos \delta_B)^{-1} - M_{y1}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_\Gamma \cdot L_{\varphi\text{к}}), \\
 F_{\text{лгн}} &= T_{x1}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_\Gamma)^{-1} - M_{y1}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_\Gamma \cdot L_{\varphi\text{н}}), \\
 F_{\text{пгн}} &= T_{x1}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_\Gamma)^{-1} + M_{y1}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_\Gamma \cdot L_{\varphi\text{н}}),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{x1}^o &= \begin{cases} T_{x1}^{\text{pec}}, & \text{при } |T_{x1}^{\text{pec}}| \leq T_{x1}^{\text{max}} \\ T_{x1}^{\text{max}} \cdot \text{sign} T_{x1}^{\text{pec}}, & \text{при } |T_{x1}^{\text{pec}}| > T_{x1}^{\text{max}} \end{cases}; \\
 M_{y1}^o &= \begin{cases} M_{y1}^{\text{pec}}, & \text{при } |M_{y1}^{\text{pec}}| \leq M_{y1}^{\text{max}} \\ M_{y1}^{\text{max}} \cdot \text{sign} M_{y1}^{\text{pec}}, & \text{при } |M_{y1}^{\text{pec}}| > M_{y1}^{\text{max}} \end{cases}; \\
 M_{z1}^o &= \begin{cases} M_{z1}^{\text{pec}}, & \text{при } |M_{z1}^{\text{pec}}| \leq M_{z1}^{\text{max}} \\ M_{z1}^{\text{max}} \cdot \text{sign} M_{z1}^{\text{pec}}, & \text{при } |M_{z1}^{\text{pec}}| > M_{z1}^{\text{max}} \end{cases}; \\
 \delta_B &= \begin{cases} \arcsin \frac{M_{z1}^o}{0,5 \cdot T_{x1}^o \cdot \cos \delta_\Gamma \cdot X_{\text{кг}}}, & \\ \text{при } |\delta_B| \leq \delta_B^{\text{max}} & \\ \delta_B^{\text{max}} \cdot \text{sign} \delta_B, & \text{при } |\delta_B| > \delta_B^{\text{max}} \end{cases},
 \end{aligned}$$

где  $T_{x1}^{\text{pec}}, M_{y1}^{\text{pec}}, M_{z1}^{\text{pec}}$  – целевые значения управляющих воздействий, сформированные регуляторами движения в режиме крейсерского хода;  $T_{x1}^{\text{max}}, M_{y1}^{\text{max}}, M_{z1}^{\text{max}}$  – максимальные значения управляющих воздействий, реализуемые ДРК в режиме крейсерского хода.

Декомпозиция управляющих воздействий  $T_{x2}, T_{y2}, T_{z2}, M_{x2}, M_{y2}, M_{z2}$  между элементами ДРК в режиме динамического позиционирования и движения с малым ходом (без использования привода поворота кормовой пары горизонтальных движителей и с использованием вертикальной группы движителей) определяется соотношениями:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{пгк}} &= T_{x2}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_\Gamma)^{-1} + T_{z2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_\Gamma)^{-1} + \\
 &\quad + M_{y2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_\Gamma \cdot L_{\varphi\text{к}})^{-1}, \\
 F_{\text{лгк}} &= T_{x2}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_\Gamma)^{-1} - T_{z2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_\Gamma)^{-1} - \\
 &\quad - M_{y2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_\Gamma \cdot L_{\varphi\text{к}})^{-1}, \\
 F_{\text{лгн}} &= T_{x2}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_\Gamma)^{-1} + T_{z2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_\Gamma)^{-1} - \\
 &\quad - M_{y2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_\Gamma \cdot L_{\varphi\text{н}})^{-1}, \\
 F_{\text{пгн}} &= T_{x2}^o \cdot (4 \cdot \cos \delta_\Gamma)^{-1} - T_{z2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_\Gamma)^{-1} + \\
 &\quad + M_{y2}^o \cdot (4 \cdot \sin \delta_\Gamma \cdot L_{\varphi\text{н}})^{-1}, \\
 F_{\text{пвк}} &= T_{y2}^o / 4 - M_{x2}^o \cdot (4 \cdot Z_B)^{-1} - M_{z2}^o \cdot (4 \cdot X_B)^{-1}, \\
 F_{\text{лвк}} &= T_{y2}^o / 4 + M_{x2}^o \cdot (4 \cdot Z_B)^{-1} - M_{z2}^o \cdot (4 \cdot X_B)^{-1}, \\
 F_{\text{лвн}} &= T_{y2}^o / 4 + M_{x2}^o \cdot (4 \cdot Z_B)^{-1} + M_{z2}^o \cdot (4 \cdot X_B)^{-1}, \\
 F_{\text{пвн}} &= T_{y2}^o / 4 - M_{x2}^o \cdot (4 \cdot Z_B)^{-1} + M_{z2}^o \cdot (4 \cdot X_B)^{-1},
 \end{aligned}$$

$$T_{x2}^o = \begin{cases} T_{x2}^{pez}, & \text{при } |T_{x2}^{pez}| \leq T_{x2}^{\max} \\ T_{x2}^{\max} \cdot \text{sign} T_{x2}^{pez}, & \text{при } |T_{x2}^{pez}| > T_{x2}^{\max} \end{cases},$$

$$M_{x2}^o = \begin{cases} M_{x2}^{pez}, & \text{при } |M_{x2}^{pez}| \leq M_{x2}^{\max} \\ M_{x2}^{\max} \cdot \text{sign} M_{x2}^{pez}, & \text{при } |M_{x2}^{pez}| > M_{x2}^{\max} \end{cases},$$

$$T_{y2}^o = \begin{cases} T_{y2}^{pez}, & \text{при } |T_{y2}^{pez}| \leq T_{y2}^{\max} \\ T_{y2}^{\max} \cdot \text{sign} T_{y2}^{pez}, & \text{при } |T_{y2}^{pez}| > T_{y2}^{\max} \end{cases},$$

$$M_{y2}^o = \begin{cases} M_{y2}^{pez}, & \text{при } |M_{y2}^{pez}| \leq M_{y2}^{\max} \\ M_{y2}^{\max} \cdot \text{sign} M_{y2}^{pez}, & \text{при } |M_{y2}^{pez}| > M_{y2}^{\max} \end{cases},$$

$$T_{z2}^o = \begin{cases} T_{z2}^{pez}, & \text{при } |T_{z2}^{pez}| \leq T_{z2}^{\max} \\ T_{z2}^{\max} \cdot \text{sign} T_{z2}^{pez}, & \text{при } |T_{z2}^{pez}| > T_{z2}^{\max} \end{cases},$$

$$M_{z2}^o = \begin{cases} M_{z2}^{pez}, & \text{при } |M_{z2}^{pez}| \leq M_{z2}^{\max} \\ M_{z2}^{\max} \cdot \text{sign} M_{z2}^{pez}, & \text{при } |M_{z2}^{pez}| > M_{z2}^{\max} \end{cases},$$

где  $T_{x2}^{pez}, T_{y2}^{pez}, T_{z2}^{pez}, M_{x2}^{pez}, M_{y2}^{pez}, M_{z2}^{pez}$  – целевые значения управляющих воздействий, сформированные регуляторами движения в режиме динамического позиционирования;  $T_{x2}^{\max}, T_{y2}^{\max}, T_{z2}^{\max}, M_{x2}^{\max}, M_{y2}^{\max}, M_{z2}^{\max}$  – максимальные значения управляющих воздействий, реализуемые ДРК в режиме динамического позиционирования. Максимальные значения управляющих воздействий ДРК для двух режимов движения аппарата, соответствующие максимальной тяге каждого из двигателей  $F_{гд}^{\max} = F_{вд}^{\max} = 500$  Н с фиксированным

ее распределением между конкурирующими каналами управления, сведены в табл. 3.

Ресурс двигателей ДРК распределен между каналами управления следующим образом:

- ресурс горизонтальных двигателей между каналами управления в режиме крейсерского хода –  $F_{Tx}^{\GammaД} = 280$  Н,  $F_{My}^{\GammaД} = 220$  Н;
- ресурс горизонтальных двигателей между каналами управления в режиме динамического позиционирования –  $F_{Tx}^{\GammaД} = 200$  Н,  $F_{Tz}^{\GammaД} = 200$  Н,  $F_{My}^{\GammaД} = 100$  Н;
- ресурс вертикальных двигателей между каналами управления в режиме динамического позиционирования –  $F_{Ty}^{\text{ВД}} = 200$  Н,  $F_{Mx}^{\text{ВД}} = 200$  Н,  $F_{Mz}^{\text{ВД}} = 100$  Н.

**■ Результаты моделирования динамики ГНПА в крейсерском режиме движения и в режиме динамического позиционирования**

1. *Крейсерский режим* является стандартным для АНПА при осуществлении типовых программных миссий со стабилизацией глубины и курса с постоянной или переменной скоростью. При этом управляющие воздействия создаются только кормовой парой горизонтальных двигателей и их поворотом в вертикальной плоскости. Для примера задавалось движение, включающее следующие элементы: старт с заданным курсовым углом с начальной скоростью 0,2 м/с и увеличением скорости до 1,0 м/с, отработку рассогласования по глубине 8 м, переход на обратный

Таблица 3. Максимальные значения управляющих воздействий ДРК

Режим движения	Управляющие воздействия ДРК					
	$T_x^{\max}$ , Н	$T_y^{\max}$ , Н	$T_z^{\max}$ , Н	$M_x^{\max}$ , Нм	$M_y^{\max}$ , Нм	$M_z^{\max}$ , Нм
Крейсерский ход (АНПА)	900	0	0	0	950	416
Позиционирование (ГНПА)	740	800	300	288	430	372

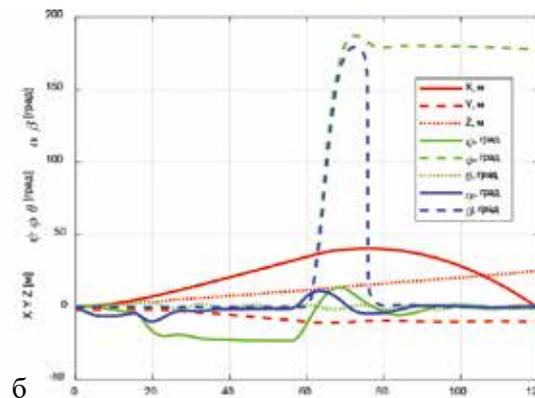
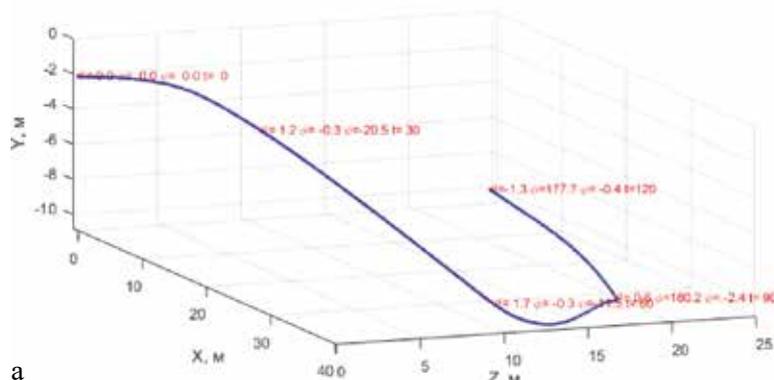


Рис. 8. Крейсерский режим движения: пример пространственной траектории (а), линейные и угловые параметры движения (б)

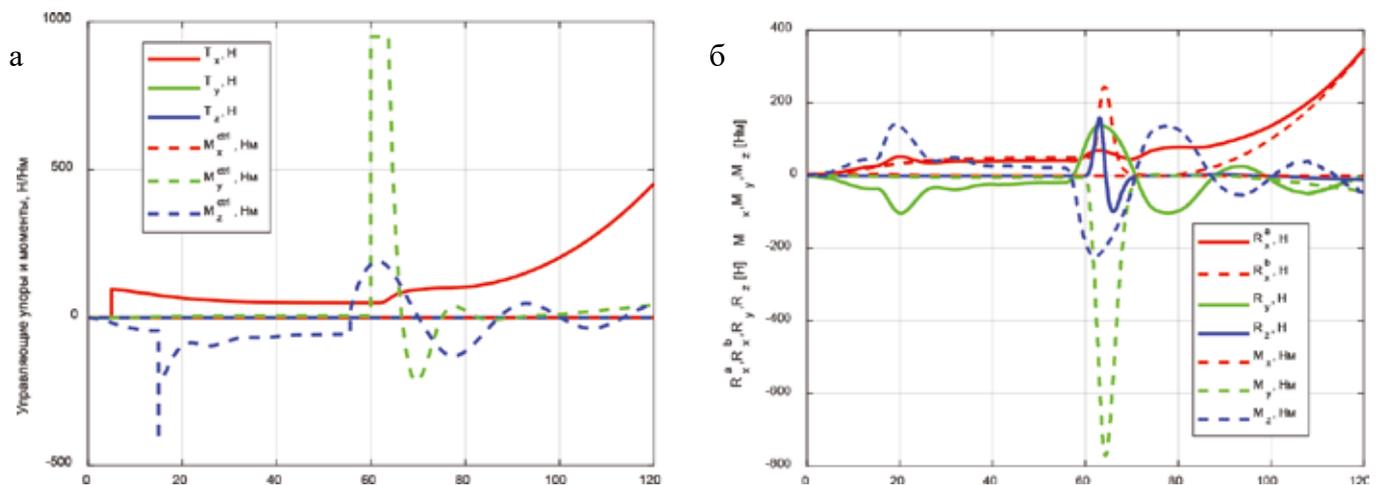


Рис. 9. Крейсерский режим движения: управляющие силы и моменты (а), силы гидродинамического сопротивления (б)

галс. Из внешних возмущений учитывались положительная плавучесть 10 Н и постоянно действующее боковое течение 0,2 м/с. Результаты моделирования движения представлены на рис. 8, 9.

Можно отметить, что динамика ГНПА в режиме крейсерского движения отвечает тем условиям, которые заданы программой движения. Устойчивость движения при отработке заданных рассогласований по курсу и глубине обеспечивается выбором параметров регуляторов, а характеристики маневренности определяются максимальными значениями управляющих усилий.

2. Режим динамического позиционирования является стандартным для ТНПА при осуществлении рабочих операций в окрестностях объекта донной инфраструктуры со стабилизацией углового и линейного положения в условиях действия возмущений от течения и кабеля связи. При этом задействованы все движители ДРК, а кормовая пара горизонтальных движителей фиксируется с нулевым углом поворота. При моделировании динамики аппарата была задана программа движения, включающая последовательно: вертикальное погружение на 8 м, боковое смещение на 5 м, продольное перемещение на 5 м, поворот на

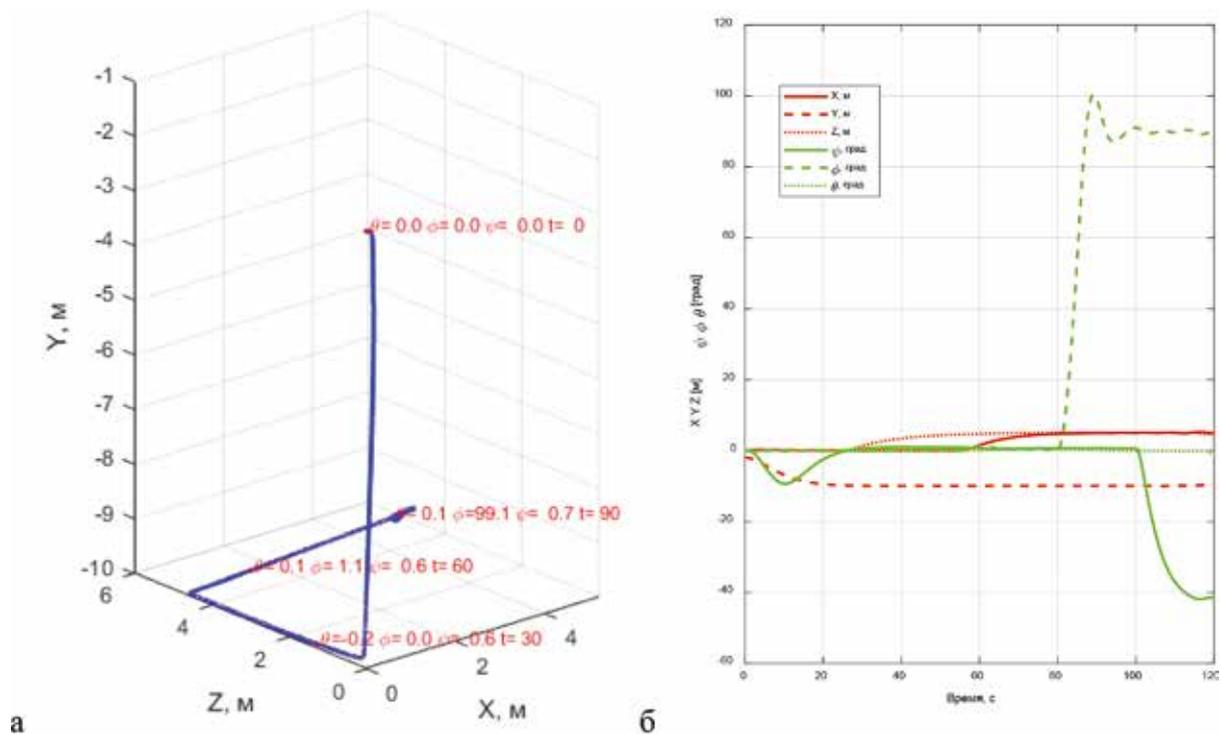


Рис. 10. Режим позиционирования: траектория движения в режиме позиционирования (а), пространственные и угловые параметры движения (б)

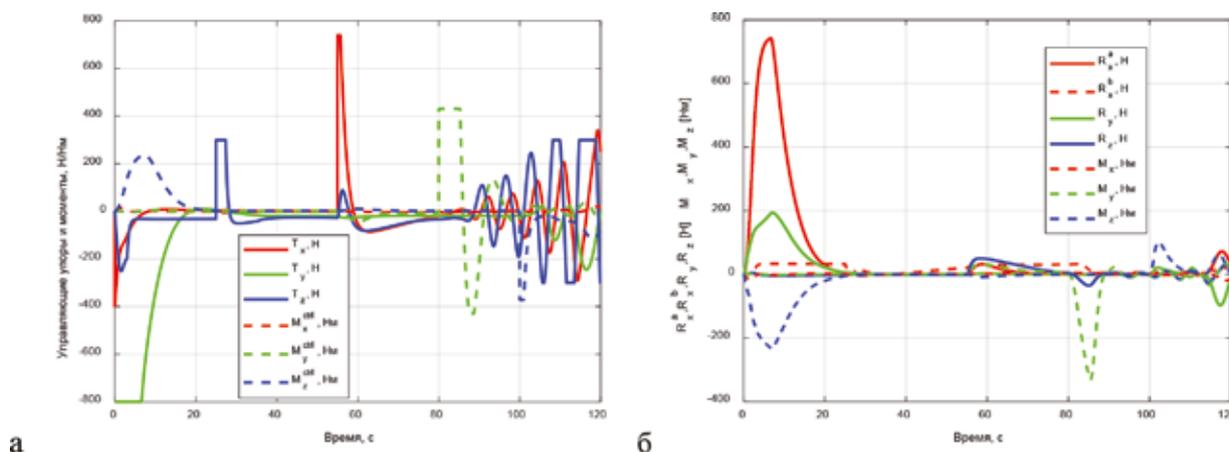


Рис. 11. Режим позиционирования: управляющие силы и моменты (а), силы гидродинамического сопротивления (б)

месте по курсу на 90°, отработка заданного рассогласования по дифференту 45°.

На рис. 10, 11 представлены траектория, параметры движения и возмущающие силы.

Динамические характеристики в режиме позиционирования обусловлены взаимодействием управляющих и возмущающих сил в 3-мерном движении. С учетом переходных процессов по курсу, крену и глубине и действия внешних сил (плавучести и бокового течения) происходит динамическое взаимодействие по всем каналам управления. Так, разворот на месте на 90° и стабилизация дифферента 45° при наличии течения сопровождаются изменением поперечной тяги в виде колебаний с выходом на ограничение. Параметрами регуляторов обеспечивается достаточно быстрое затухание (15–20 с) переходных процессов при отработке начальных рассогласований.

### Заключение

Отметим основные положения и результаты работы.

1. Создание ГНПА как нового объекта подводной робототехники приводит к постановке актуальной задачи, связанной с разработкой динамической модели, в которой должны быть отражены функциональные особенности АНПА и ТНПА и их динамические свойства. Перечень основных вопросов разработки включает:

- построение корректной математической модели пространственного движения в типовых обзорно-поисковых режимах и специальных режимах динамического позиционирования при обследовании объектов;

- адаптацию прикладных вычислительных средств комплекса *Simulink* для исследования динамических свойств системы управления ГНПА, применение технологии «виртуальной продувки» для идентификации гидродинамических характеристик ГНПА;

- разработку структуры и математической модели движительно-рулевого комплекса ГНПА, обеспечивающего все многообразие пространственных движений с учетом функциональных особенностей ГНПА;

- оценку динамических свойств ГНПА по результатам вычислительных экспериментов.

2. Результаты исследований и модельных вычислений по перечисленным выше вопросам свидетельствуют о том, что динамика пространственного движения ГНПА, совмещающего в себе функции АНПА и ТНПА, удовлетворяет общим требованиям по маневренности (управляемости), устойчивости по отношению к параметрам вектора состояния и внешним возмущениям. Принятые в динамической модели ГНПА структуры и алгоритмы могут быть взяты за основу при разработке системы управления движением с учетом всех факторов, влияющих на динамику ГНПА. В частности, одним из таких существенных факторов является влияние оптоволоконного кабеля связи при использовании супервизорного режима управления. Исследование этого и других аналогичных вопросов является темой дальнейших исследований.

Работа выполнена по теме государственного задания ИПМТ ДВО РАН «Научные исследования и разработки в области новых технологий создания перспективных морских робототехнических комплексов...», № госрегистрации АААА-А17-117013010055-6.

## 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. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Л.: Судостроение, 1973. 511 с.
5. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Медведев А.В. О некоторых задачах динамики и управления пространственным движением АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 13–26.
6. 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.
7. Киселев Л.В., Багницкий А.В., Медведев А.В. Идентификация гидродинамических характеристик автономного подводного робота с использованием модельных и экспериментальных данных // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25, № 1 (96). С.78–92.
8. Kiselev L.V., Bagnitskii A.V., Medvedev A.V.. Identification of AUV Hydrodynamic Characteristics Using Model and Experimental Data // Gyroscopy and Navigation. 2017. Vol. 8, No. 3. P. 217–225.
9. 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: 03.02.2021).
10. Вельтишев В. В. Анализ влияния скошенного потока на рабочие характеристики движителей необитаемых подводных аппаратов // Вест. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2010. №. С. 97–106.
11. Пат. 2290338 РФ МПК В63G 8/16, В63Н 20/08. Подводный аппарат повышенной маневренности / Горнак В.Е., Мальцева С.В. – № 2004136450/11, заявл.: 14.12.2004; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36.

## Об авторах

**Киселев Лев Владимирович**, д.т.н., главный научный сотрудник  
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., заведующий лабораторией исполнительных устройств и систем телеуправления, ведущий научный сотрудник

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** – старший научный сотрудник

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

## Для цитирования:

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. DOI: 10.37102/1992-4429\_2021\_35\_01\_02

# SPECIFIC FEATURES OF A HYBRID UNDERWATER VEHICLE MOTION DYNAMIC MODEL

L.V. Kiselev, V.V. Kostenko, A.V. Medvedev

When creating hybrid uninhabited underwater vehicle (HUV), one of the main problems is to ensure the specified dynamic properties, taking into account the features of design and the variety of spatial motion modes. To solve this problem, a dynamic model is being developed based on combining the functions of autonomous and remotely controlled underwater vehicles (AUV / ROV). The main elements in the model structure are: a mathematical model of spatial motion with 6-degrees of freedom, computing means of "virtual hydrodynamics", adaptive motion controllers, a combined propulsion and steering system, and an external environment model. The research task is to determine the parameters of the mathematical model (hydrodynamic characteristics, control and disturbing forces, hydrodynamic drag forces, propulsion and maneuvering characteristics of the vehicle) in the cruising and positioning modes. The HUV "Freedom ROV" (Oceanering, USA) was adopted as a prototype of the HUV for the choice of the geometric shape and basic design parameters. As a result of computational experiments, estimates of the HUV dynamic parameters are obtained, which indicate its performance in the implementation of complex motion modes with the interaction of the entire functional elements. As a consequence, this allows us to develop optimal recommendations for the structure and characteristics of the HUV multitasking information and control system when performing a wide class of underwater technical work.

**Key words:** autonomous, remotely controlled, hybrid uninhabited underwater vehicle (AUV, ROV, HUV), dynamic and computational models, motion control, hydrodynamics, propulsion and steering systems.

## References

1. Matvienko Yu.V., Kostenko V.V., Scherbatyuk A.F., Remezov A.V. Development of the technological potential of autonomous underwater vehicles. Underwater investigations and robotics. 2020. No. 4(34). P. 4–14.
2. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. and other. *Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tehnologii* [Autonomous underwater robots: systems and technologies]. Moscow: Nauka, 2005. 400 p.
3. Inzartzev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Scherbatyuk A.F. *Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tehnologii, primenenie* [Underwater robotic systems: systems, technologies, application]. *Otv. red: L.V. Kiselev*. Vladivostok: Dalnauka, 2018, 367 p.
4. Vojtkunskij Ja.I., Pershits R.Ja., Titov I.A. *Spravochnik po teorii korablja* [Handbook of ship theory]. L.: Sudostroenie, 1973. 511 p.
5. Kiselev L.V., Inzartzev A.V., Medvedev A.V. On some problems of dynamics and control of spatial motion of the AUV. Underwater investigations and robotics, 2006. No. 2. P. 13–26.
6. Kiselev L.V., Medvedev A.V. *Sravnitel'nyj analiz i optimizacija dinamičeskikh svoystv avtonomnykh podvodnykh robotov razlichnykh proektov i konfiguracij* [Comparative analysis and optimization of the dynamic properties of autonomous underwater robots of various designs and configurations]. Underwater investigations and robotics, 2012. No. 1(13). P. 24–35.
7. Kiselev L.V., Bagnickij A.V., Medvedev A.V. *Identifikacija gidrodinamičeskikh harakteristik avtonomnogo podvodnogo robota s ispol'zovaniem model'nyh i jeksperimental'nyh dannyh* [Identification of hydrodynamic characteristics of an autonomous underwater robot using model and experimental data]. *Giroskopija i navigacija* [Gyroscopy and Navigation]. 2017. Vol. 25. No. 1 (96). P. 78–92.
8. Kiselev L. V., Bagnitckii A. V., Medvedev A. V. Identification of AUV Hydrodynamic Characteristics Using Model and Experimental Data. *Giroskopija i navigacija* [Gyroscopy and Navigation], 2017. Vol. 8, No. 3. P. 217–225.
9. 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> (usage date: 03.02.2021).
10. Veltishhev V.V. *Analiz vlijanija skoshennogo potoka na rabochie harakteristiki dvizhitelej neobitaemykh podvodnykh apparatov* [Analysis of the effect of a canted stream on the operating characteristics of the propulsion devices of unmanned underwater vehicles]. *Vest. MGTU im. N.Je. Bauman*. *Seriya: Mashinostroenie*. 2010. No. S. P. 97–106.
11. Gornak V.E., Malceva S.V. *Podvodnyj apparat povyshennoj manevrennosti* [High maneuverability underwater vehicle] patent RF No. 2290338, Bul. No. 17 at 20.06.2011.

### Recommended citation:

Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V. SPECIFIC FEATURES OF A HYBRID UNDERWATER VEHICLE MOTION DYNAMIC MODEL. Underwater Investigation and Robotics. 2021. No. 1(35). P. 18–30. DOI: 10.37102/1992-4429\_2021\_35\_01\_02

## About the authors

**Kiselev Lev Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences. Chief Researcher.  
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences  
**Address:** 5a Sukhanova st., Vladivostok, Russia  
**Research interests:** underwater robotics, autonomous and hybrid underwater robots, control and navigation systems, dynamic models, trajectory survey of geophysical fields.  
**Phone:** +7(902)506-16-77  
**E-mail:** levkiselev1@yandex.ru, kiselev@marine.febras.ru  
**ORCID ID:** 0000-0001-9312-9708

**Kostenko Vladimir Vladimirovich**, Leading Researcher PhD in Engineering Science, Head of Laboratories,  
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences  
**Address:** 5a Sukhanova st., Vladivostok, Russia  
**Research interests:** Underwater robotics, motion control systems, propulsion and steering systems, dynamic models, towed systems.  
**Phone:** +7 (984) 145-43-85  
**E-mail:** kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru  
**SPIN-код:** 2310-3141  
**ORCID ID:** 0000-0002-3821-3787  
**Resercher ID:** AAF-6399-2021  
**Scopus ID:** 57189036440

**Medvedev Andrey Vladimirovich**, senior researcher  
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences  
**Address:** 5a Sukhanova st., Vladivostok, Russia  
**Research interests:** underwater robotics, computing systems and models, dynamics of control systems, hydrodynamics of underwater robots.  
**Phone:** +7(914)708-10-14  
**E-mail:** auv@list.ru  
**ORCID ID:** 0000-0001-5678-8966