

# ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И ДИНАМИКА ГИБРИДНОГО АНПА В РЕЖИМЕ КОНТРОЛЯ ШУМОВОЙ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ

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

Рассматриваются функциональная структура системы управления движением и динамика гибридного автономного необитаемого подводного аппарата (ГАНПА) при оперативном мониторинге шумового поля в морской акватории, результатом которого является определение дальности и пеленга источника шума. Для организации движения ГАНПА, состоящего из нескольких этапов, используется управляющий комплекс, обеспечивающий выполнение заданных требований к динамике аппарата и к условиям эффективных измерений параметров шумового поля с помощью скалярно-векторной приемной системы. Особое внимание уделяется корректному описанию математических моделей динамики аппарата, движительно-рулевого комплекса, систем регулирования плавучести и момента остойчивости. Оптимизация работы ГАНПА в режиме акустической станции осуществляется путем модельной и экспериментальной настройки параметров данных систем с учетом особенностей их технического исполнения. В качестве прототипа ГАНПА при анализе его структуры, гидродинамических характеристик и динамических процессов принят АНПА ММТ-300. Приведены результаты вычислительного эксперимента по оценке характеристик управляющего комплекса во всех режимах работы ГАНПА в процессе контроля шумовой обстановки.

**Ключевые слова:** Гибридный автономный необитаемый подводный аппарат, шумовая подводная обстановка, акустическая станция, управление движением, динамическая модель, комбинированная система регулирования плавучести и момента остойчивости.

## Введение

Контроль подводной обстановки в локальных акваториях относится к числу важных прикладных задач, решение которых связано с анализом шумового звукового поля на основе векторно-скалярных акустических измерений с борта гибридного АНПА (ГАНПА) [1]. Далее будем следовать выводам, полученным в данной работе. Размещение векторно-скалярной приемной системы на борту ГАНПА обеспечивает увеличение ее эффективности за счет поиска и приема сигналов из зон повышенной освещенности контролируемого звукового поля. Кроме того, группой таких аппаратов-роботов обеспечивается быстрое оборудование контролируемой акватории распределенной многоэлементной антенной системой [2–8].

В работе [1] показано, что выполнение миссии ГАНПА при определении дальности и пеленга источника шума из заданной точки акватории может быть представлено следующей последовательностью действий:

- перевод аппарата в вертикальное положение с дифферентом на корму ( $\psi=+90^\circ$ ) после определения географических координат на поверхности средствами спутниковой навигационной системы;
- бесшумное вертикальное погружение до глубины места с дифферентом  $\psi=+90^\circ$  за счет регулируемой остаточной плавучести со скоростью 0,01–0,05 м/с для выявления зон повышенной освещенности контролируемого звукового поля;
- вертикальное перемещение аппарата на глубину выявленной зоны повышенной освещенности.

ценности под маршевыми движителями с последующим переходом на бесшумную стабилизацию средствами регулирования плавучести для записи шумового поля при нулевой остаточной плавучести аппарата;

- экстренное вертикальное всплытие аппарата под маршевыми движителями до поверхности после определения параметров источника шума для уточнения географических координат точки сбора данных и трансляции полученных результатов по радиосвязи.

Движение аппарата представляет собой комбинацию трех режимов: погружение (всплытие) в вертикальном положении, вертикальное перемещение под маршевыми движителями на заданную глубину погружения и бесшумное зависание на заданной глубине при измерении параметров шумового поля. При этом управляющие воздействия ГАНПА реализуются с помощью комплекса, в состав которого входят системы регулирования плавучести (СРП) и момента остойчивости (СРМО), движительно-рулевой комплекс (ДРК). Для оценки параметров движения необходимо учитывать как гидродинамические свойства ГАНПА, так и конструктивные и параметрические характеристики управляющего комплекса.

Исследованию динамических свойств системы управления движением ГАНПА в нетипичных для АНПА режимах использования посвящена настоящая статья. Очевидно, что решение поставленных задач возможно лишь при использовании корректной модели движения, имеющей ряд особенностей, обусловленных спецификой задач и способами их технической реализации. При исследовании динамических свойств ГАНПА на основе модельных и экспериментальных данных будем использовать результаты работ [9–14].

Структура статьи построена следующим образом. В первом разделе приводится структура и динамическая модель систем управляющего комплекса ГНПА. Во втором разделе приведена математическая модель динамики ГАНПА, учитывающая все особенности управляющего комплекса, включая характеристики систем регулирования остойчивости и плавучести, результаты стендовых и бассейновых испытаний ДРК, оценку гидродинамических характеристик ГАНПА, полученных путем виртуальной продувки 3D-модели аппарата, конструктивный облик которого описан в работе [1]. Третий раздел статьи посвящен результатам моделирования динамики ГАНПА во всех предусмотренных режимах движения

## 1. Структура и динамическая модель систем управляющего комплекса

### 1.1. Технологические и функциональные особенности управляющего комплекса

Для обеспечения заданных режимов движения при решении задачи локального мониторинга шумовой обстановки в составе управляющего комплекса ГАНПА реализованы следующие исполнительные средства:

- движительно-рулевой комплекс (ДРК), выполненный по схеме, включающей два кормовых маршевых движителя (МД) с синхронным поворотом в вертикальной плоскости связанной системы координат (ССК) аппарата, обеспечивающий формирование управляющих воздействий по каналам скорости хода, курса, дифферента и глубины погружения [17];
- система регулирования плавучести (СРП), состоящая из кормового и носового модуля, расположенных симметрично относительно центра масс аппарата и позволяющих изменять остаточную плавучесть аппарата и его статический дифферент [15, 16];
- система регулирования момента остойчивости (СРМО) маятникового типа [18–20], выполненная в двух сборочных конфигурациях, которая обеспечивает управление статическим углом дифферента в диапазоне  $\pm 90$  градусов.

Компоновочная схема управляющего комплекса ГАНПА, объединяющая ДРК, СРП и СРМО, приведена на рис. 1.

Здесь приняты следующие обозначения:  $O_v X_c Y_c Z_c$  – связанная система координат (ССК) аппарата;  $O_v$  – центр объема аппарата, совмещенный с его центром масс и центром объема СРМО;  $\theta, \varphi, \psi$  – углы крена, курса и дифферента соответственно;  $T_x, T_y, T_z$  – проекции управляющих сил ДРК на оси ССК;  $M_x, M_y, M_z$  – управляющие моменты, действующие на аппарат относительно осей ССК;  $O_m$  – центр масс СРМО;  $\beta_n$  – угол поворота центра масс СРМО вокруг оси  $O_v Z_c$  ССК;  $h$  – метацентрическая высота поворотного модуля СРМО;  $F_n, F_n$  – упоры левого и правого маршевых движителей (МД) соответственно;  $\delta$  – угол установки МД на поворотной платформе;  $\alpha_n$  – угол поворота МД в вертикальной плоскости ССК;  $L_\varphi, L_\psi$  – плечи моментов управления МД по курсу и дифференту соответственно;  $P_n = \rho g V_n$  – плавучесть от изменения объема носового модуля СРП;  $V_n$  – изменяемый объем носового модуля СРП;  $P_k = \rho g V_k$  – плавучесть от изменения объема кормо-

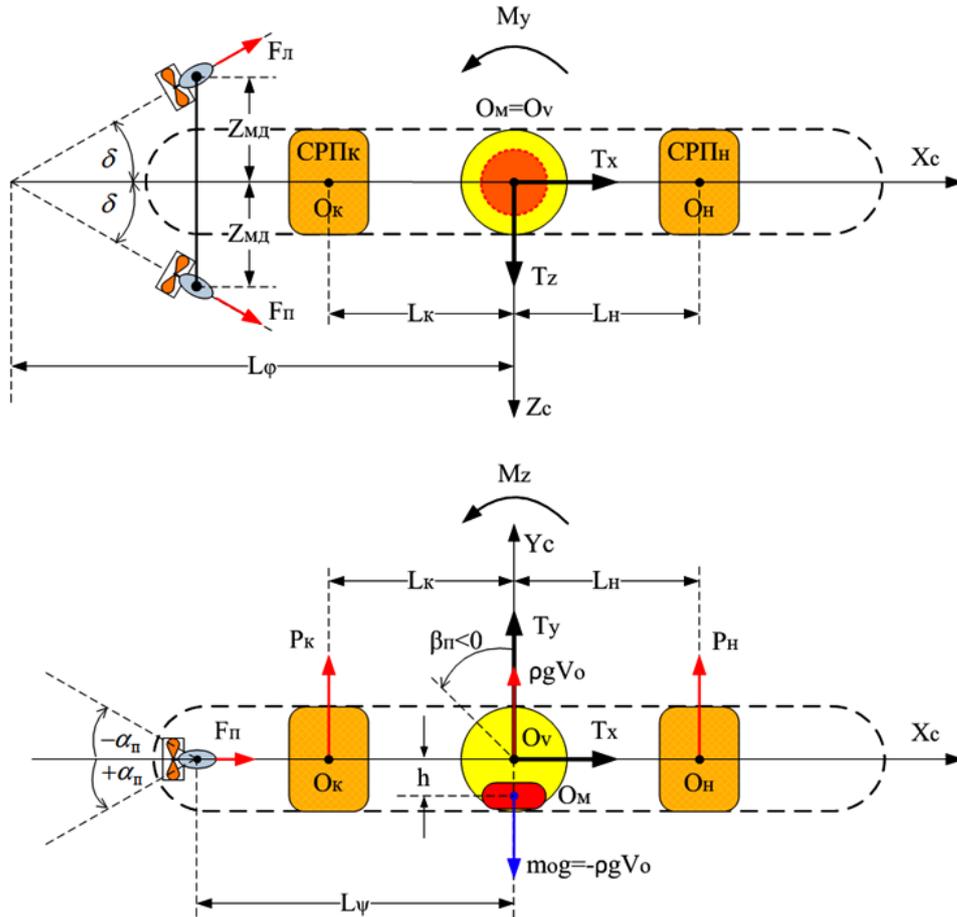


Рис. 1. Компоночная схема управляющего комплекса ГАНПА

вого модуля СРП;  $V_k$  – изменяемый объем кормового модуля СРП;  $\rho = 1025 \text{ кг/м}^3$  – плотность морской воды;  $L_n, L_k$  – плечи момента управления СРП по дифференту;  $V_o, m_o$  – объем и масса поворотного модуля СРМО соответственно.

Связь управляющих воздействий комплекса с упорами маршевых движителей, имеющих переменный угол поворота в вертикальной плоскости, плавучестями модулей СРП и углом поворота СРМО определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 T_x &= (F_{\text{л}} + F_{\text{п}}) \cos \delta \cos \alpha_{\text{п}} + (P_{\text{н}} + P_{\text{к}}) \sin \psi, \\
 T_y &= (F_{\text{л}} + F_{\text{п}}) \cos \delta \sin \alpha_{\text{п}} + (P_{\text{н}} + P_{\text{к}}) \cos \psi \cos \theta, \\
 T_z &= (F_{\text{п}} - F_{\text{л}}) \sin \delta \cos \alpha_{\text{п}} - (P_{\text{н}} + P_{\text{к}}) \cos \psi \sin \theta, \\
 M_x &= (F_{\text{л}} - F_{\text{п}}) \cos \delta \sin \alpha_{\text{п}} Z_{\text{мд}} - \\
 &\quad - m_o g h \cos(\beta_{\text{п}} - \psi) \sin \theta, \\
 M_y &= (F_{\text{п}} - F_{\text{л}}) \sin \delta \cos \alpha_{\text{п}} L_{\phi} - \\
 &\quad - (L_{\text{н}} P_{\text{н}} + L_{\text{к}} P_{\text{к}}) \cos \psi \sin \theta, \\
 M_z &= (F_{\text{л}} + F_{\text{п}}) \cos \delta \sin \alpha_{\text{п}} L_{\psi} + \\
 &\quad + (L_{\text{н}} P_{\text{н}} + L_{\text{к}} P_{\text{к}}) \cos \psi \cos \theta + m_o g h \cdot \sin(\beta_{\text{п}} - \psi). \quad (1)
 \end{aligned}$$

### 1.2. Математическая модель ДРК

Модель ДРК определяется характеристиками маршевых движителей и привода их поворота в вертикальной плоскости ССК. Исследованию характеристик движителей АНПА на основе модельных, швартовных и бассейновых экспериментов посвящены работы [9–14]. В настоящей работе в качестве прототипа принят маршевый движитель АНПА ММТ-300 разработки ИПМТ, статическая характеристика которого соответствует выражениям:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{мд}}^0(N) &= K_2^{+N} N^2 + K_1^{+N} N + K_0^{+N} \text{ для } +10 < N \leq +127, \\
 F_{\text{мд}}^0(N) &= 0 \text{ для } |N| \leq 10, \\
 F_{\text{мд}}^0(N) &= K_2^{-N} N^2 + K_1^{-N} N + K_0^{-N} \text{ для } -10 > N \geq -127; \quad (2)
 \end{aligned}$$

где:  $N$  – код управления электроприводом МД,  $K_2^{+N}, K_1^{+N}, K_0^{+N}, K_2^{-N}, K_1^{-N}, K_0^{-N}$  – коэффициенты полиномов, интерполирующих экспериментальную статическую характеристику МД.

В результате бассейновых испытаний прототипа маршевых движителей [9] установлено, что их ди-

намика может быть описана аperiодическим звеном первого порядка:

$$T_{\text{мд}} \dot{F}_{\text{мд}} + F_{\text{мд}} = F_{\text{мд}}^0(N), \quad (3)$$

где  $T_{\text{мд}}$  – постоянная времени МД.

С учетом ограничений на угол и скорость поворота, а также с допущением о безошибочной отработке заданного угла  $\alpha_n^p$  электропривод поворота МД можно описать следующим образом:

$$\begin{cases} T_{\text{пн}} \dot{\alpha}_n + \alpha_n = \alpha_n^p; \\ \alpha_n = \alpha_n, \text{ при } |\alpha_n| \leq \alpha_n^{\text{max}}; \\ \alpha_n = \alpha_n^{\text{max}} \cdot \text{sign}(\alpha_n), \text{ при } |\alpha_n| > \alpha_n^{\text{max}}; \\ |\dot{\alpha}_n| \leq \dot{\alpha}_n^{\text{max}}; \end{cases} \quad (4)$$

где:  $T_{\text{пн}}$  – постоянная времени привода поворота МД;  $\alpha_n^{\text{max}}, \dot{\alpha}_n^{\text{max}}$  – максимальные значения угла и скорости поворота МД, соответственно.

Параметры математической модели ДРК приведены в таблице 1

Таблица 1

Параметры маршевых движителей и привода поворота ДРК

| $T_{\text{мд}}$ | $T_{\text{пн}}$ | $\alpha_n^{\text{max}}$ | $\dot{\alpha}_n^{\text{max}}$ | $K_1^{+N}$ | $K_1^{-N}$ | $K_0^{+N}$ | $K_0^{-N}$ | $K_1^{+N}$ | $K_1^{-N}$ | $K_0^{+N}$ | $K_0^{-N}$ |
|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| сек             | сек             | град                    | %/сек                         | Н          | Н          | Н          | Н          | Н          | Н          | Н          | Н          |
| 0,15            | 0,7             | ±30                     | ±30                           | 0,001      | 0,198      | -2,0       | -0,002     | 0,126      | 1,2        |            |            |

На рис. 2 поясняется использование МД и привода поворота при вертикальном движении ГНПА в

режиме акустической станции с учетом допущения малых значений угла крена и отсутствия регулирования угла курса. При этом зависимость управляющих воздействий от тяги и поворота МД определяется соотношением (5):

$$\begin{aligned} T_x &= (F_{\text{л}} + F_{\text{п}}) \cos \delta \cos \alpha_n, \\ T_y &= (F_{\text{л}} + F_{\text{п}}) \cos \delta \sin \alpha_n, \\ T_z &= 0, M_x = 0, M_y = 0, \\ M_z &= (F_{\text{л}} + F_{\text{п}}) \cos \delta \sin \alpha_n L_{\psi}. \end{aligned} \quad (5)$$

### 1.3. Математическая модель СРП

Зависимость управляющих воздействий СРП на аппарат от изменения объемов носового и кормового модулей с учетом допущения малых углов крена имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} T_x &= P_n \sin \psi + P_k \sin \psi, \\ T_y &= P_n \cos \psi + P_k \cos \psi, \\ T_z &= 0, M_x = 0, M_y = 0, \\ M_z &= L_n P_n \cos \psi + L_k P_k \cos \psi. \end{aligned} \quad (6)$$

Изменение объемов модулей СРП помимо регулирования плавучести приводит к смещению исходного центра объема аппарата вдоль оси  $O_v X_c$  ССК (формула 7), который в состоянии равных объемов модулей совпадает с центрами масс и объема аппарата для обеспечения эффективной работы СРМО:

$$X_v = \frac{(V_n - V_k) \cdot L}{V_a + V_n - V_k}, \quad (7)$$

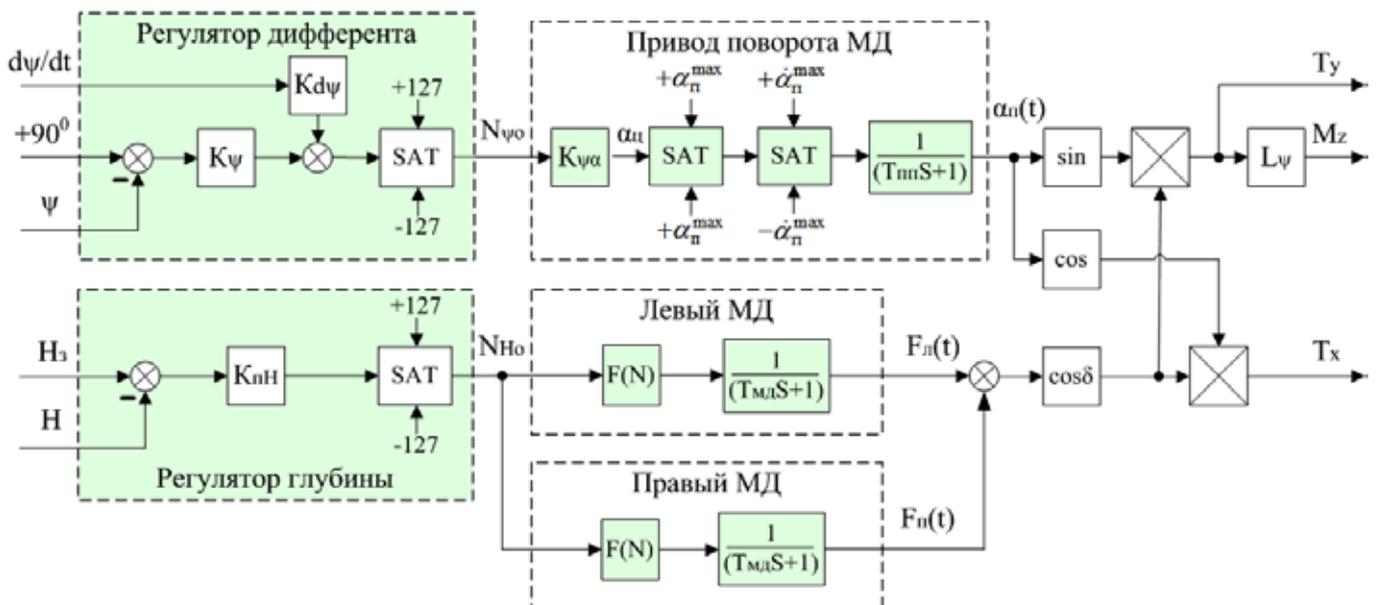


Рис. 2. Функциональная схема использования ДРК при движении в режиме акустической станции

где:  $X_v$  – смещение центра объема аппарата, вызванное изменением объемов модулей СРП;  $L = L_k = L_n$  – расстояние от модулей СРП до центра масс аппарата. Вследствие смещения центра объема  $X_v$  и без учета собственной остойчивости аппарат переходит в вертикальное положение с углом дифферента  $\pm 90^\circ$ , знак которого зависит от соотношения объемов модулей СРП (см. рис. 3). При этом появляется момент остойчивости:

$$M_Z^{СРП} = -m_a g X_v (V_n, V_k) \sin(\psi - 90^\circ), \text{ для } V_n > V_k,$$

$$M_Z^{СРП} = -m_a g X_v (V_n, V_k) \sin(\psi + 90^\circ), \text{ для } V_n < V_k. \quad (8)$$

где  $m_a g$  – вес аппарата на воздухе.

Для определения математической модели отработки заданной плавучести модулями СРП примем допущение об отсутствии влияния давления воды на момент нагрузки электропривода насоса, а также будем считать безошибочной отработку приводом заданного числа оборотов. Эти допущения позволяют использовать следующую упрощенную математическую модель отработки заданной плавучести каждым из модулей СРП [16]:

$$T_{\text{пн}} \frac{dP_i}{dt} + P_i = P_{i3},$$

$$|\dot{P}_i| \leq \dot{P}_{i\text{max}},$$

$$P_i = P_i, \text{ для } 0 < P_i \leq P_{i\text{max}};$$

$$P_i = P_{i\text{max}}, \text{ for } P_i \geq P_{i\text{max}};$$

$$P_i = 0, \text{ для } P_i \leq 0.$$
(9)

где:  $T_{\text{пн}}$  – постоянная времени электропривода гидравлического насоса,  $P_{i\text{max}} = \rho g U_{\text{max}}$  – максимальная плавучесть одной секции СРП при полностью накачанной мембране;  $\dot{P}_{\text{max}} = (n_{\text{max}} / 60) \cdot (w_n / 1000) \eta_v \rho g$  – максимальная скорость изменения плавучести, Н/сек;  $n_{\text{max}}$  – максимальная частота вращения привода насоса, об/мин;  $w_i$  – объем насоса, см<sup>3</sup>/оборот,  $\eta_v$  – объемный КПД насоса.

В таблице 2 приведены численные значения параметров математической модели СРП

Таблица 2

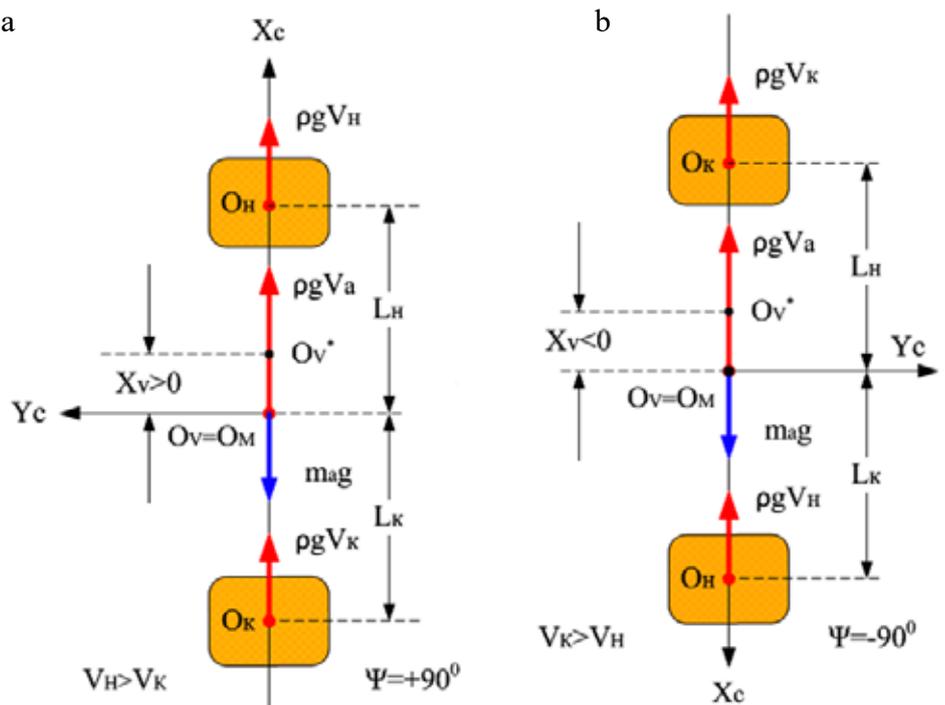
Параметры математической модели СРП

| $T_{\text{пн}}$ | $P_{\text{max}}$ | $\dot{P}_{\text{max}}$ | $P_a$ | $L_n$ | $L_k$ | $\rho$             | $w_n$               |
|-----------------|------------------|------------------------|-------|-------|-------|--------------------|---------------------|
| сек             | Н                | Н/сек                  | Н     | м     | м     | кг/дм <sup>3</sup> | см <sup>3</sup> /об |
| 0,15            | 36,2             | ±1,2                   | -36,2 | 0,65  | -0,65 | 1,025              | 1,6                 |

### 1.4. Математическая модель СРМО

Обеспечить бесшумное и экономичное управление статическим углом дифферента в требуемом диапазоне  $0 \pm 90^\circ$  позволяет применение системы регулирования момента остойчивости, суть которой заключается в разделении конструкции аппарата на две сборки: одну из них строительную, фиксированную относительно связанной системы координат  $O_v X_c Y_c Z_c$  и вторую – управляющую дифферентом [18]. Каждую сборку уравнивают в воде плавучестями, совмещая в строительной сборке центр масс с центром величины, а в сборке, управляющей диф-

Рис. 3. Смещение центра объема аппарата из-за изменения объемов модулей СРП:  
а –  $V_n > V_k$  б –  $V_n < V_k$



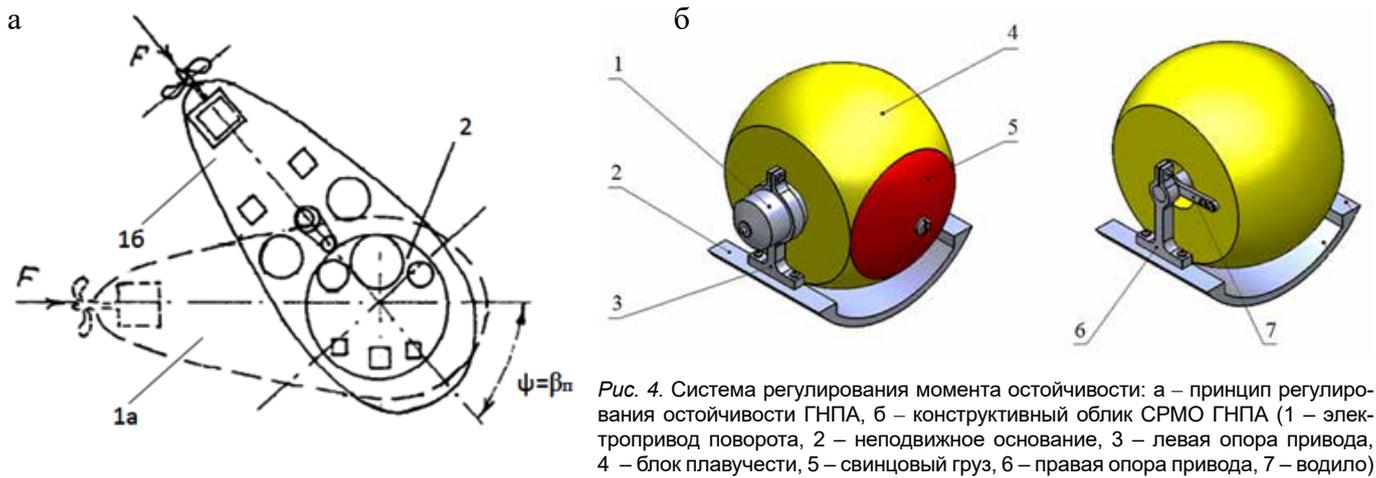


Рис. 4. Система регулирования момента устойчивости: а – принцип регулирования устойчивости ГНПА, б – конструктивный облик СРМО ГНПА (1 – электропривод поворота, 2 – неподвижное основание, 3 – левая опора привода, 4 – блок плавучести, 5 – свинцовый груз, 6 – правая опора привода, 7 – водило)

ферентом, диаметрально разносят центры тяжести и величины относительно оси дифференцирования – оси взаимного вращения сборок, которая параллельна главной поперечной оси аппарата  $O_v Z_c$ . Принцип действия СРМО поясняет рис. 4, где приняты следующие условные обозначения: 1а – угловое положение строительной сборки аппарата до поворота сборки управления дифферентом 2, 1б – угловое положение строительной сборки после поворота сборки управления дифферентом 2 на угол  $\beta_n$ .

СРМО позволяет регулировать статический угол дифферента в диапазоне  $\pm 90$  градусов за счет вращения маятникового модуля нейтральной плавучести, состоящего из смещенного относительно оси вращения груза и монолитного блока плавучести (см. рис. 4, б). Центр объема этого модуля находится на оси его вращения, а груз обеспечивает смещение

центра масс и, как следствие, маятниковый момент. Использование СРМО для перевода аппарата в вертикальное состояние поясняет рис. 5.

Управляющий момент устойчивости, возникающий при повороте модуля СРМО на угол  $\beta_n$  относительно вертикальной оси ССК аппарата, соответствует выражению:

$$M_z^{CPMO} = m_o g h \cdot \sin \beta_n, \quad (10)$$

где:  $m_o$  – масса вращающегося модуля,  $h$  – метацентрическая высота СРМО.

Допущение о безошибочной отработке приводом заданного поворота позволяет использовать следующую упрощенную модель электропривода СРМО, учитывающую также ограничения на максимальные значения скорости и угла поворота подвижного модуля:

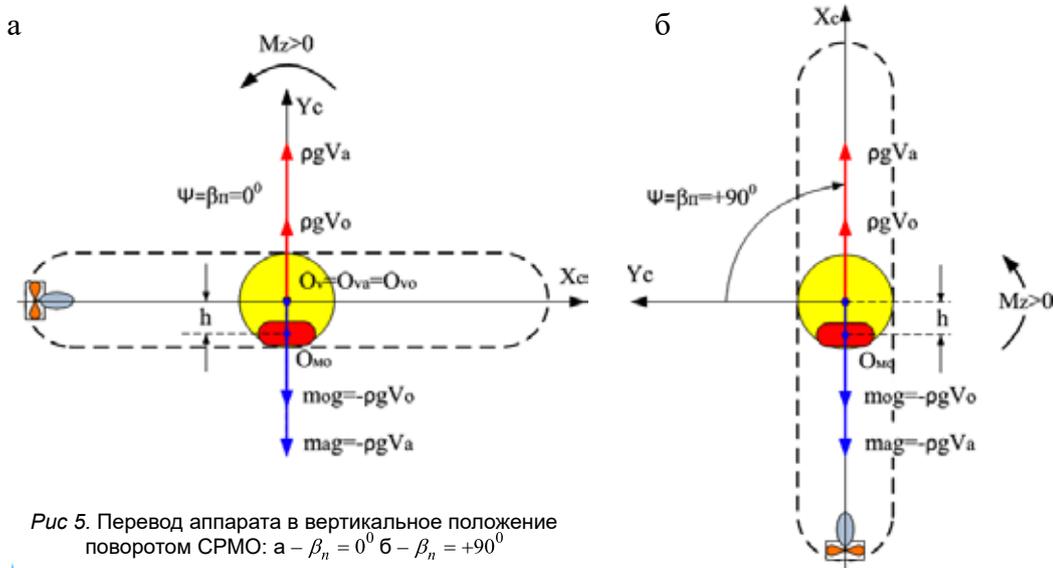


Рис. 5. Перевод аппарата в вертикальное положение поворотом СРМО: а –  $\beta_n = 0^\circ$  б –  $\beta_n = +90^\circ$

Таблица 4

Последовательность формирования управляющих воздействий при движении ГАНПА в режиме АС

| Время цикла, с | $P_a$ , Н | $P_n$ , Н | $P_k$ , Н | $P$ , Н | $\beta_n^p$ , град | $M_0$ , Нм | $T_x$ , Н |
|----------------|-----------|-----------|-----------|---------|--------------------|------------|-----------|
| 0              | -36       | 36        | 36        | 36      | 0                  | 5,5        | 0         |
| 0-3            | -36       | 36        | 36        | 36      | 0→90               | 5,5        | 0         |
| 3-33           | -36       | 36        | 36→0      | 36→0    | 90                 | 5,5→23,4   | 0         |
| 33-48          | -36       | 36→18     | 0         | 0→-18   | 90                 | 23,4→17,2  | 0         |
| 48-548         | -36       | 18→36     | 0         | -18→0   | 90                 | 17,2→23,4  | 0         |
| 548-563        | -36       | 36        | 0         | 0       | 90                 | 23,4       | 0         |
| 563-588        | -36       | 36        | 0         | 0       | 90                 | 23,4       | 43,3      |
| 588-708        | -36       | 36        | 0         | 0       | 90                 | 23,4       | 0         |
| 708-733        | -36       | 36        | 0         | 0       | 90                 | 23,4       | 43,3      |
| 733-763        | -36       | 36        | 0→36      | 36      | 90                 | 5,5        | 0         |
| 763-766        | -36       | 36        | 36        | 36      | 90→0               | 5,5        | 0         |

$$\left\{ \begin{aligned} T_{по} \frac{d\beta_n}{dt} + \beta_n &= \beta_n^p; \\ \beta_n &= \beta_n^p, \text{ при } |\beta_n| \leq \beta_n^{\max}; \\ \beta_n &= \beta_n^{\max} \cdot \text{sign}(\beta_n), \text{ при } |\beta_n| > \beta_n^{\max}; \\ \dot{\beta}_n &= \dot{\beta}_n^p, \text{ при } |\dot{\beta}_n| \leq \dot{\beta}_n^{\max}; \\ \dot{\beta}_n &= \dot{\beta}_n^{\max} \cdot \text{sign}(\dot{\beta}_n), \text{ при } |\dot{\beta}_n| > \dot{\beta}_n^{\max} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

где:  $T_{по}$  – постоянная времени электропривода поворота СРМО,  $\beta_n^p$  – заданный угол поворота модуля СРМО,  $\beta_n^{\max}$  – максимальный угол поворота,  $\dot{\beta}_n^{\max}$  – максимальная скорость поворота.

Значения параметров математической модели СРМО сведены в таблицу 3

Таблица 3

Параметры математической модели СРМО

| $T_{по}$ | $m_o$ | $\dot{\beta}_n^{\max}$ | $\beta_n^{\max}$ | $h$  | $m_o g h$ |
|----------|-------|------------------------|------------------|------|-----------|
| сек      | кг    | град/сек               | град             | м    | Нм        |
| 0,7      | 6,3   | ±30                    | ±90              | 0,08 | 5,5       |

### 1.5. Управление движением ГАНПА в режиме АС

Для моделирования миссии ГАНПА в режиме акустической станции была принята последовательность формирования управляющих воздействий СРП, СРМО и ДРК в ходе выполнения одного цикла работ в контролируемой акватории с глубиной места 100 м продолжительностью 766 секунд, приведенная в табл. 4, где приняты следующие условные обозначения:  $P = P_a + P_n + P_k$  – суммарная остаточная плавучесть аппарата с учетом СРП;  $M_0 = M_{Z0}^{СРМО} + M_{Z0}^{СРП}$  – суммарный момент остойчивости ГАНПА, складывающийся из момента остойчивости СРМО (10) и СРП (8);  $T_x = 2F_{MD}^{\max}$  – максимальная суммарная тяга маршевых движителей при всплытии/заглублении ГАНПА.

## 2. Математическая модель динамики ГАНПА

Пространственное движение ГАНПА представляется в виде совокупности трех плоских движений, кинематическая взаимосвязь которых осуществляется только через управляющие и возмущающие воздействия. Принятые при этом системы координат и схемы действия сил на аппарат приведены на рис. 6.

В уравнениях движения ГАНПА (12) использованы обозначения, принятые в работах [10–15], в частности:  $m_x, m_y, m_z, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$  – 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 управляющего комплекса в связанной системе координат;  $\vartheta, \chi, \kappa$  – углы подъема, поворота и наклона траектории;  $\varphi, \psi, \theta$  – углы курса, дифферента и крена аппарата;  $R_x, R_y, R_z, M_x, M_y, M_z$  – гидродинамические силы и моменты;  $\lambda, \mu, \nu$  – углы атаки, дрейфа и скольжения;  $M_0$  – момент остойчивости, определяемый соответствующими моментами

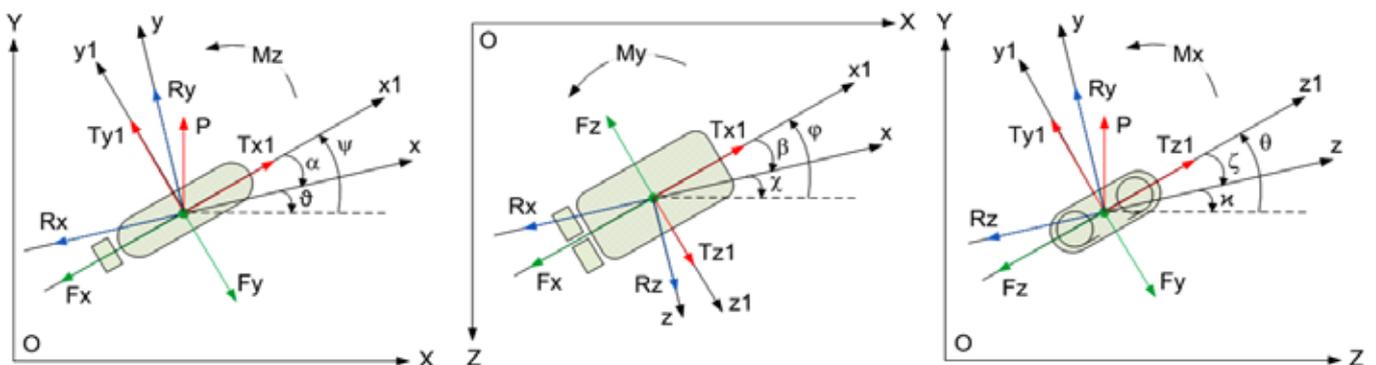


Рис. 6. Схема действующих на ГАНПА сил и моментов в связанной с ГАНПА системе координат

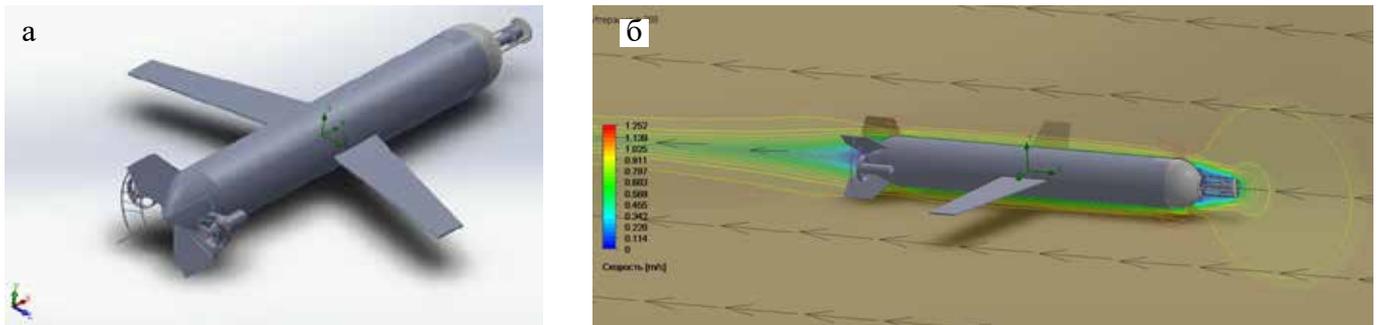


Рис. 7. К определению позиционных гидродинамических характеристик ГАНПА: а – 3D-модель аппарата; б – диаграмма поля скоростей обтекания для угла атаки 0 град

СРП (8) и СРМО (10);  $P = P_a + P_H + P_K$  – суммарная плавучесть аппарата с учетом СРП:

$$\begin{aligned}
 m_x \dot{v} &= -R_x(v, \alpha) + P \sin \vartheta + T_x \cos \alpha - T_y \sin \alpha, \\
 m_y v \dot{\vartheta} &= R_y(v, \alpha, \psi) + P \cos \vartheta + T_y \cos \alpha + T_x \sin \alpha, \\
 J_{zz} \ddot{\psi} &= M_0 \sin \psi + M_z(v, \alpha, \psi) + M_z, \\
 \dot{X} &= v \cos \vartheta, \quad \dot{Y} = -v \sin \vartheta, \quad \psi = \vartheta + \alpha. \\
 \\
 m_x \dot{v} &= -R_x(v, \beta) + T_x \cos \beta - T_z \sin \beta, \\
 m_z v \dot{\chi} &= R_z(v, \beta, \varphi) + T_z \cos \beta + T_x \sin \beta, \\
 J_{yy} \ddot{\varphi} &= M_y(v, \beta, \varphi) + M_y, \\
 \dot{X} &= v \cos \chi, \quad \dot{Z} = v \sin \chi, \quad \varphi = \chi + \beta.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

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

Гидродинамические характеристики АНПА/ГНПА традиционно определяются путем виртуальной продувки его трехмерной модели (см. рис. 7) с использованием вычислительной модели, подробно описанной в ряде работ, например, в работах [9–14]. В табл. 5 сведены массовые и размерные параметры

Таблица 5

**Массогабаритные характеристики ГАНПА**

| Характеристика  | Значение          |
|---|-------------------|
| Размеры (длина/ширина/высота), м  | 2,3/1,7/0,4       |
| Остаточная плавучесть без учета СРП, Н  | -36               |
| Вес аппарата на воздухе, кг   | 100               |
| Метацентрическая высота без учета СРМО и СРП, м   | 0                 |
| Массы с учетом присоединенной воды $m_x, m_y, m_z$ , кг                                   | 103,5/193,8/182,6 |
| Моменты инерции с учетом присоединенной воды $J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}$ , кг/м <sup>2</sup> | 1,3/19,5/19,9     |

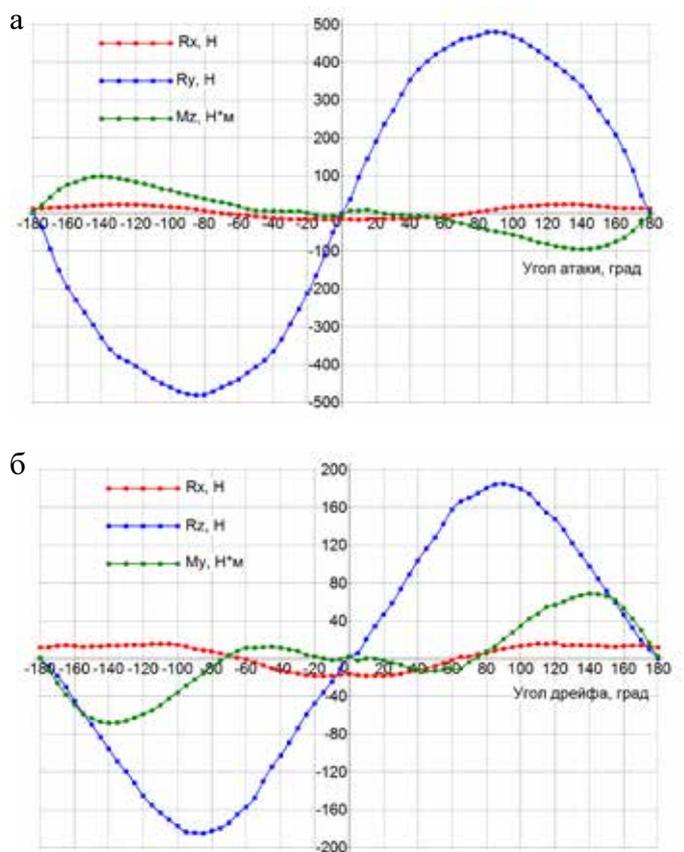


Рис. 8. Зависимости гидродинамических позиционных характеристик ГАНПА от угла атаки (а) и угла дрейфа (б)

ГНПА, а результаты вычислений гидродинамических сил и моментов сопротивления показаны на рис. 8.

**3. Результаты моделирования движения ГАНПА в режиме акустической станции**

Общая функциональная схема моделирующего комплекса состоит из диаграмм Simulink Matlab, ввод и вывод параметров для подсистем осуществляется через m-скрипты MATLAB, алгоритм распределения управляющих воздействий реализован в модуле

Рис. 9. Структурная схема моделирующего комплекса в среде Simulink Matlab для исследования движения ГАНПА в режиме акустической станции

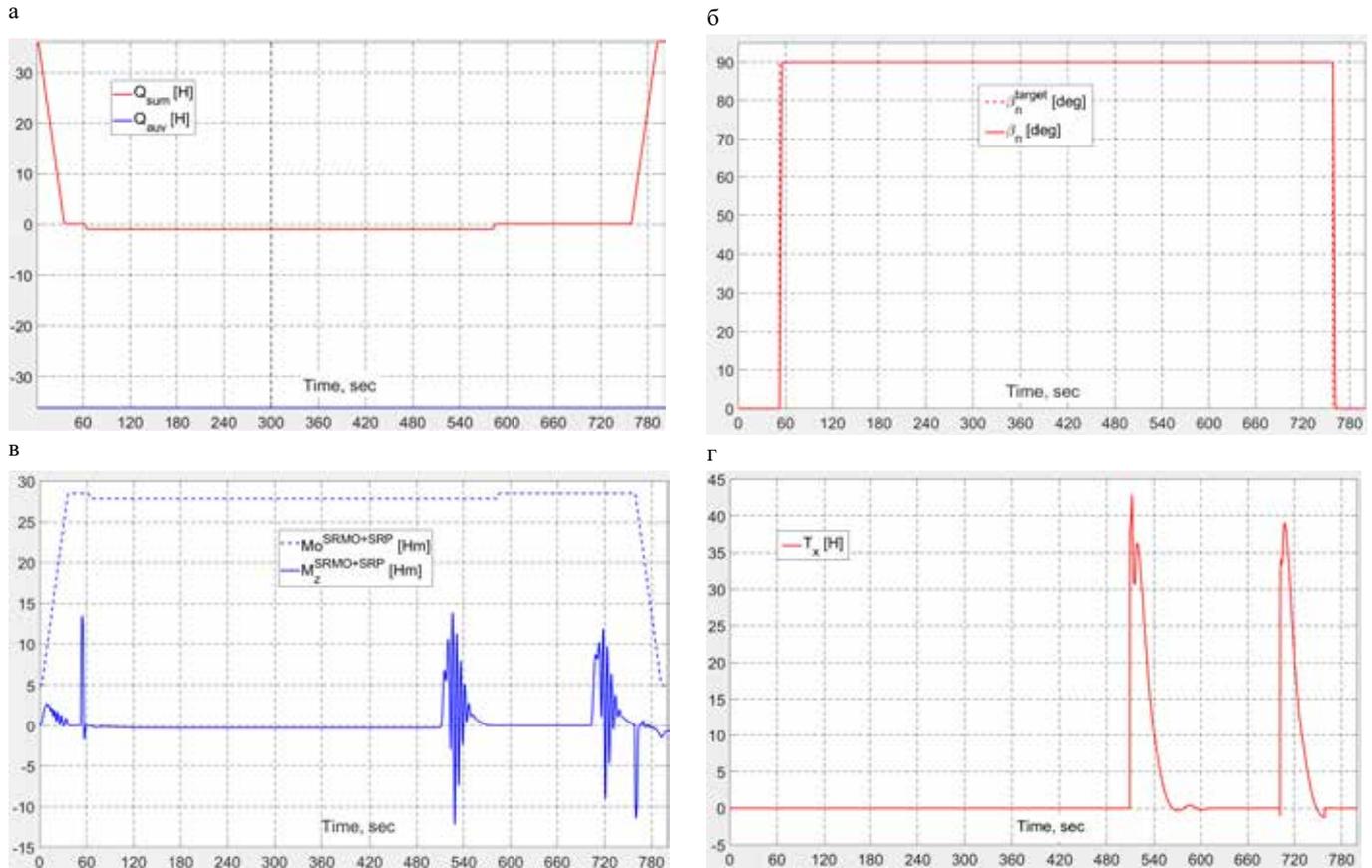
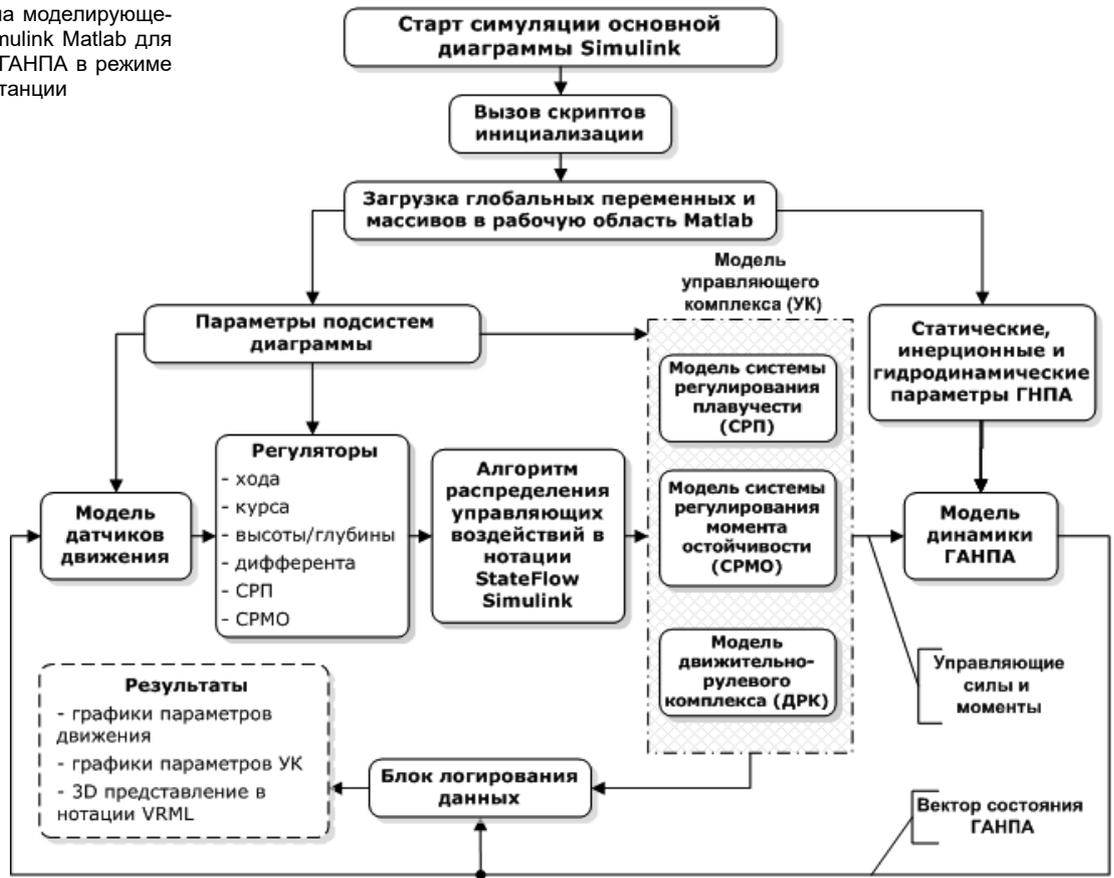


Рис. 10. Управляющие воздействия ГАНПА в режиме АС: а – плавучесть аппарата с учетом СРП, б – угол поворота СРМО, в – восстанавливающий момент СРМО и СРП, г – тяга МД

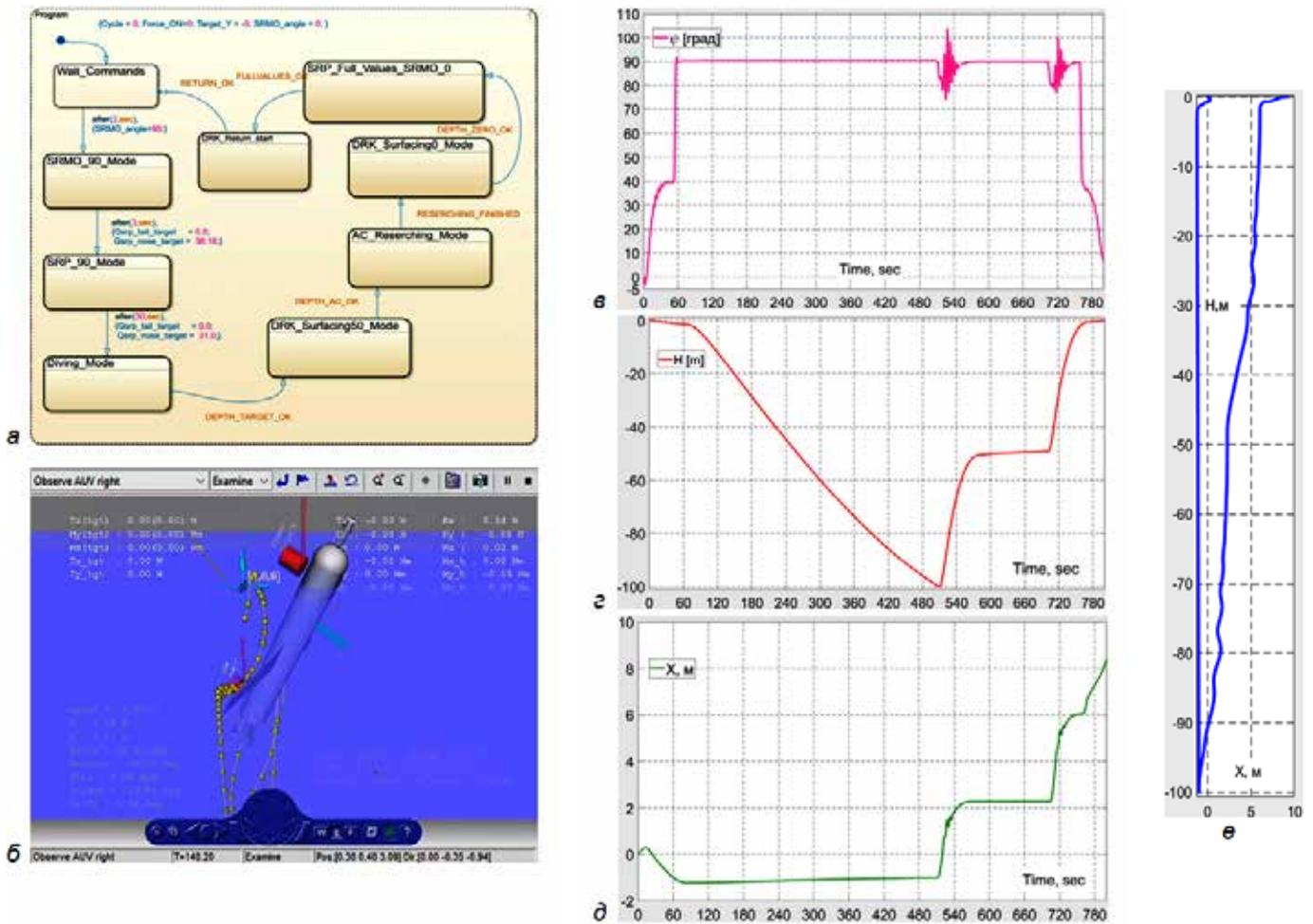


Рис. 11. Параметры движения ГАНПА в режиме АС: а – блок-схема алгоритма моделирования, б – VR визуализация параметров движения ГАНПА, в – угол дифферента, г – глубина погружения, д – горизонтальное смещение, е – траектория движения аппарата в продольно вертикальной плоскости OXY

StateFlow Simulink. Структурная схема комплекса представлена на рис. 9.

В ходе модельного эксперимента были определены параметры движения ГАНПА в последовательности управляющих воздействий, соответствующей табл. 4: перевод в вертикальное положение ( $P_k=0$  Н,  $\beta_n=+90^\circ$ ), бесшумное заглубление до 100 м ( $P=P_a+P_n+P_k=-1$  Н), всплытие под маршевыми движителями ( $T_x=+86$  Н) на глубину 50 м, бесшумное зависание в течение 2 мин ( $P=0$  Н), всплытие до поверхности под движителями, перевод в горизонтальное положение после отключения МД ( $P=36$  Н,  $\beta_n=0^\circ$ ). Результаты моделирования представлены на рис. 10–11.

### Заключение

Отметим основные результаты проведенного исследования:

1. В соответствии с моделью использования ГАНПА определены структура и функциональные особенности управляющего комплекса при осуществлении заданных режимов движения в вертикальной плоскости в процессе пеленгования источника шума. При этом ГАНПА исполняет роль акустической станции с векторно-скалярной антенной системой, а управляющий комплекс поддерживает оптимальные условия для проведения измерений шумового поля. Определен состав управляющего комплекса, включающий ДРК, системы регулирования плавучести и момента остойчивости, работающие во взаимодействии согласно выполняемой миссии.

2. Разработаны математические модели всех элементов системы управления движением ГАНПА, отражающие их функциональные, конструктивные и динамические особенности с учетом полученных модельных и экспериментальных данных. Алгоритм формирования управляющих воздействий блочно-модульного типа обеспечивает реализацию и ото-

бражение всех необходимых процессов при работе ГАНПА.

3. Разработан объектно-ориентированный имитационный комплекс, включающий вычислительный инструментальный гидродинамической виртуальной продувки, динамические модели всех составляющих системы управления движением ГАНПА. Результаты моделирования динамики ГАНПА при его работе в режиме акустической станции свидетельствуют о точном соответствии полученных данных по каналам управления тем требованиям, которые определены назначением аппарата.

4. Установлена возможность перевода ГАНПА в вертикальное положение с необходимым для его стабилизации моментом остойчивости, бесшумного заглубления со скоростью 0,1–0,2 м/с и бесшумного зависания на заданной глубине в течение продолжи-

тельного периода времени (2 мин). При этом горизонтальное смещение между точками начала вертикального заглубления аппарата на 100 м и его всплытия на поверхность не превышает 10 м.

Работа выполнена по теме государственного задания ИМТП ДВО РАН «Исследование и разработка принципов и методов создания многофункциональных робототехнических комплексов для изучения и освоения Мирового океана» № государственной регистрации 121030400088-1 и при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-61-10024 «Методы голографической обработки гидроакустических сигналов для обнаружения и идентификации малозвучных источников с использованием гибридных автономных необитаемых подводных аппаратов и векторно-скалярных антенных систем на океаническом шельфе»

#### 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. Матвиенко Ю.В., Каморный А.В., Хворостов Ю.А. Об одном подходе к решению задачи обнаружения подводного источника шумовых сигналов // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 37–43.
3. Хворостов Ю. А., Матвиенко Ю. В. Характеристики собственного шумоизлучения малогабаритного АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2019. №. 4. С. 58–63.
4. Казначеев И. В. и др. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 1. С. 33–45.
5. Кузькин В.М., Матвиенко Ю.В., Переселков С.А. Применение интерферометрической обработки для локализации малозвучных источников звука // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4. С. 49–57.
6. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Spectrogram and localization of a sound source in shallow water // Acoustical physics. 2017. Vol. 63. P. 449–461.
7. Казначеева Е.С. и др. Оценка дальности обнаружения малогабаритного подводного аппарата по его шумовому полю // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 4 (38). С. 80.
8. Патент № 2664971 Российская Федерация, МПК В63G 8/00(2006.01). Автономный необитаемый аппарат для измерения дифференциальных характеристик векторного звукового поля : № 2017119843 : заявл. 07.06. 2017 : опубликовано 24.08.2018 / Матвиенко Ю.В., Костенко В.В., Гой В.А., Хворостов Ю.А. ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает ФОНД ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. 11 с.: ил.
9. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / под ред. Л.В. Киселева. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2018. 368 с.
10. 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.
11. Киселев Л.В., Костенко В.В., Медведев А.В. Особенности динамической модели пространственного движения гибридного необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 1. С. 18–30.
12. Киселев Л.В., Костенко В.В., Медведев А.В. К оценке динамических характеристик АНПА «МТ-3500» на основе модельных и экспериментальных данных // Подводные исследования и робототехника. 2022. №3 (41). С. 33–42.
13. 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. С. 104.
14. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Selected Features of Autonomous Underwater Robot Dynamics under Near-Bottom Equidistant Motion Control // Gyroscopy and Navigation. 2019. Vol. 10, No. 2. P. 90–98.
15. Ремизов И. И., Говорун И. В. Об оценке целесообразности использования системы регулирования плавучести подводного аппарата на основе принципа изменения его объема // Морской вестник. 2019. №. 1. С. 14–17.
16. Гой В.А., Костенко В.В. Регулирование плавучести и дифферента автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. 2016. №. 1. С. 4–14.
17. Патент № 2290338 Российская Федерация, МПК В63G 8/16(2006.01), В63Н 20/08(2006.01). Подводный аппарат повышенной маневренности : № 2004136450/11 : заявл. 14.12.2004 : опубликовано 27.12.2006 / Горнак В.Е., Мальцева С.В. ; заявитель ИПМТ ДВО РАН. 6 с. : ил.
18. Патент № 2421372 Российская Федерация, МПК В63G 8/00(2006.01). Способ обеспечения управляемости подводным аппаратом: № 2007141792/11 : заявл. 14.11.2007 : опубликовано 20.06.2011 / Комаров В.С., Комаров П.В. 7 с. : ил.
19. Быканова А.Ю., Костенко В.В., Стороженко В.А., Толстоногов А.Ю. Малогабаритный ТНПА повышенной маневренности с регулированием остойчивости // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 3 (29). С. 4–12.
20. Tolstonogov A.Y. et al. The compact ROV with Variable Center of Gravity and its Control // 2019 IEEE Underwater Technology (UT). – IEEE, 2019. С. 1–7.

## Об авторах

**КИСЕЛЕВ Лев Владимирович**, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории робототехнических систем

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева 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 им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

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

**Научные интересы:** подводная робототехника, системы управления движением автономных и телеуправляемых подводных роботов, движительно-рулевые комплексы, динамические модели, подводные привязные системы.

Тел.: +7 (423) 243-24-16

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

**БЫКАНОВА Анна Юрьевна**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории исполнительных устройств и систем телеуправления

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

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

**Научные интересы:** подводная робототехника, необитаемые подводные аппараты, манипуляционные устройства, системы стыковки

Тел.: +7 (423) 243-24-16

E-mail: Vladianna@mail.ru

ORCID ID: 0000-0002-3040-1345

Scopus ID: 7202004207

**МЕДВЕДЕВ Андрей Владимирович**, старший научный сотрудник лаборатории исполнительных устройств и систем телеуправления

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

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

**Научные интересы:** подводная робототехника, системы управления движением автономных и телеуправляемых подводных роботов, вычислительная гидродинамика, динамические модели, алгоритмы обследования океанических аномалий.

Тел.: +7 (914) 708-10-14

E-mail: auv@list.ru

ORCID ID: 0000-0001-5678-8966

Scopus ID: 7202004207

## Для цитирования:

Киселев Л.В., Костенко В.В., Медведев А.В., Быканова А.Ю. ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И ДИНАМИКА ГИБРИДНОГО АНПА В РЕЖИМЕ КОНТРОЛЯ ШУМОВОЙ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ // Подводные исследования и робототехника. 2023. №. 4 (46). С. 29–42. DOI: 10.37102/1992-4429\_2023\_46\_04\_03. EDN: KJQXXL.



# PROBLEM-ORIENTED INTEGRATED MOTION CONTROL SYSTEM AND DYNAMICS OF A HYBRID AUV IN THE UNDERWATER NOISE CONTROL MODE

**L.V. Kiselev, V.V. Kostenko, A.V. Medvedev, A.Yu. Bykanova**

The functional structure of the motion control system and the dynamics of a hybrid autonomous underwater vehicle (HAUV) are considered during operational monitoring of the noise field in the sea. To organize the movement of the HAUV, which consists of several stages, a control complex is used that ensures the fulfillment of the specified requirements for the dynamics of the vehicle and the conditions for effective measurements of the parameters of the noise field using a scalar-vector receiving system. Particular attention is paid to the correct description of mathematical models of the vehicle dynamics, propulsion and steering complex, buoyancy and moment of stability control systems. Optimization of the operation of the HAUV in the acoustic station mode is carried out through model and experimental adjustment of the parameters of these systems, taking into account the features of their technical design. When analyzing its structure, hydrodynamic characteristics and dynamic processes, the MMT-300 AUV was adopted as a prototype of the HAUV. The results of a computational experiment to evaluate the characteristics of the control complex in all modes of movement of the vehicle in the process of monitoring the noise environment are presented.

**Keyword:** hybrid autonomous underwater vehicle, underwater noise environment, acoustic station, dynamic model, buoyancy control system, moment of stability control system, propulsion complex.

## Reference

1. Matvienko Yu.V., Kostenko V.V., Shcherbatyuk A.F., Remezov A.V. Development of the technological potential of autonomous uninhabited underwater vehicles. *Underwater research and robotics*. 2020. No. 4(34), pp. 4-14.
2. Matvienko Yu.V., Kamorny A.V., Khvorostov Yu.A. On one approach to solving the problem of detecting an underwater source of noise signals. *Underwater research and robotics*. 2018. No. 2 (26). pp. 37-43.
3. Khvorostov Yu. A., Matvienko Yu. V. Characteristics of the own noise emission of a small-sized AUV. *Underwater research and robotics*. 2019. No. 4. pp. 58-63.
4. Kaznacheev I.V. et al. Interferometric method for detecting a moving sound source with a vector-scalar receiver. *Acoustic Journal*. 2018. Vol. 64. No. 1. pp. 33-45.
5. Kuzkin V.M., Matvienko Yu.V., Pereselkov S.A. Application of interferometric processing for localization of low-noise sound sources. *Underwater research and robotics*. 2019. No. 4. pp. 49-57.
6. Kuznetsov G. N., Kuz'kin V. M., Pereselkov S. A. Spectrogram and localization of a sound source in shallow water. *Acoustical physics*. 2017. Vol. 63. pp. 449-461.
7. Kaznacheeva E. S. et al. Estimation of the detection range of a small-sized underwater vehicle based on its noise field. *Underwater research and robotics*. 2021. No. 4 (38). P. 80.
8. Matvienko Yu.V., Kostenko V.V., Goy V.A., Khvorostov Yu.A. Autonomous uninhabited device for measuring the differential characteristics of a vector sound field. RF Patent No. 2664971, Bull. No. 24, dated August 24, 2018.
9. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Underwater robotic systems: systems, technologies, applications. Ed. L.V. Kiselev. Vladivostok: IMTP FEB RAS, 2018. 368 p.
10. Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V. Motion control and dynamics of a hybrid underwater vehicle when patrolling sea areas along equidistant trajectories in complex bottom topography. *Underwater research and robotics*. 2021. No. 3 (37). P. 46.
11. Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V. Features of a dynamic model of spatial motion of a hybrid uninhabited underwater vehicle. *Underwater research and robotics*. 2021. No. 1. pp. 18-30.
12. Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V. To assess the dynamic characteristics of the AUV "MT-3500" based on model and experimental data. *Underwater research and robotics*. 2022. No. 3 (41). pp. 33-42.
13. Kiselev L.V., Medvedev A.V. On some features of the dynamics of an autonomous underwater robot when controlling equidistant movement near the bottom. *Gyroscopy and navigation*. 2019. Vol. 27. No. 1. P. 104.
14. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Selected Features of Autonomous Underwater Robot Dynamics under Near-Bottom Equidistant Motion Control. *Gyroscopy and Navigation*, 2019. Vol. 10, No. 2, pp. 90-98.
15. Remizov I. I., Govorun I. V. On assessing the feasibility of using a system for regulating the buoyancy of an underwater vehicle based on the principle of changing its volume. *Morskoy Vestnik*. 2019. No. 1. pp. 14-17.
16. Goy V. A., Kostenko V. V. Regulation of buoyancy and trim of an autonomous underwater robot. *Underwater research and robotics*. 2016. No. 1. pp. 4-14.
17. Gornak V.E., Maltseva S.V. Underwater vehicle with increased maneuverability. RF patent No. 2290338, Bull. No. 36 of December 27, 2006.

18. Komarov V.S., Komarov P.V. Method for ensuring controllability of an underwater vehicle. RF Patent No. 2421372, Bull. No. 17 dated June 20, 2011.

19. Bykanova A.Yu., Kostenko V.V., Storozhenko V.A., Tolstonogov A.Yu. Small-sized ROV with increased maneuverability with stability control. Underwater research and robotics. 2019. No. 3 (29). pp. 4–12.

20. Tolstonogov A. Y. et al. The compact ROV with Variable Center of Gravity and its Control. 2019 IEEE Underwater Technology (UT). IEEE, 2019. pp. 1-7.

## About the authors

**KISELEV Lev Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences, chief researcher of robotic systems laboratory, Institute of Marine Technology Problems Far East Branch 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:** 0000-0001-9312-9708

**KOSTENKO Vladimir Vladimirovich**, Ph.D., leading researcher, head laboratory of actuating devices and remote control system, Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences

**Address:** 5a, Sukhanov Str., Vladivostok, 690950

**Research interests:** underwater robotics, motion control systems for autonomous and remote-controlled underwater robots, propulsion and steering systems, dynamic models, underwater tethering systems.

**Phone :** +7 (423) 243-24-16

**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

**BYKANOVA Anna Yurievna**, Ph.D., Senior Researcher of actuating devices and remote control system laboratory, Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences

**Address:** 5a, Sukhanov Str., Vladivostok, 690950

**Research interests:** underwater robotics, unmanned underwater vehicle, manipulation device, docking system

**Phone :** +7 (423) 243-24-16

**E-mail:** Vladianna@mail.ru

**ORCID ID:** 0000-0002-3040-1345

**MEDVEDEV Andrei Vladimirovich**, senior researcher, laboratory of actuating devices and remote control system, Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences

**Address:** 5a, Sukhanov Str., Vladivostok, 690950

**Research interests:** underwater robotics, motion control systems for autonomous and remote-controlled underwater robots, hydrodynamics, dynamic models, ocean anomalies investigation by AUV.

**Phone :** +7 (914) 708-10-14

**E-mail:** auv@list.ru

**ORCID ID:** 0000-0001-5678-8966

**Scopus ID:** 7202004207

## Recommended citation:

Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V., Bykanova A.Yu. PROBLEM-ORIENTED INTEGRATED MOTION CONTROL SYSTEM AND DYNAMICS OF A HYBRID AUV IN THE UNDERWATER NOISE CONTROL MODE. Underwater investigations and robotics. 2023. No. 4 (46). P. 29–42. DOI: 10.37102/1992-4429\_2023\_46\_04\_03. EDN: KJQXXL.

