

Л. В. КИСЕЛЕВ, А. В. МЕДВЕДЕВ

## О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ДИНАМИКИ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЭКВИДИСТАНТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ВБЛИЗИ ДНА

*Выполнение поисково-обследовательских миссий автономного подводного робота связано, как правило, с движением по эквидистантным траекториям вблизи дна. Наибольшую сложность по маршруту следования представляет управление движением в вертикальной плоскости при наличии препятствий, связанных с рельефом дна. При обнаружении препятствий с помощью многоканальной эхолокационной системы переднего обзора обеспечивается эквидистантное движение подводного аппарата с отслеживанием профиля рельефа дна. Исследована динамическая модель движения с заданными требованиями к структуре и параметрам управления. Приведен сравнительный анализ динамических свойств системы управления в зависимости от конструктивных и функциональных особенностей исполнительных органов и дальномерной эхолокационной системы.*

**Ключевые слова:** подводная робототехника, автономные необитаемые подводные аппараты (роботы), управление движением, динамические модели, рельеф дна.

### Введение

Использование автономного необитаемого подводного аппарата-робота (АНПА/АПР) для гидролокационного обзора и фотосъемки рельефа дна, гидрофизических исследований в придонном пространстве, обследования донных объектов связано с организацией движения по эквидистанте от дна и обходом или огибанием препятствий. Для определения дистанций до дна и обнаружения препятствий используются многоканальные эхолокационные системы высокого разрешения (ЭЛС) или многолучевые эхолокаторы. Управление движением по эквидистанте осуществляется посредством корректируемой программы, которая прогнозирует пространственную траекторию и ориентирует аппарат вдоль нее. При построении алгоритма управления показания эхолокаторов используются для аппроксимации видимой части поверхности рельефа участками плоскостей. Каждый участок поверхности описывается геометрическими параметрами в системе координат, связанной с корпусом аппарата. Вся траектория представляется в виде отрезков, каждый из которых минимизирует длину эквидистанты по отношению к сопряженным плоским элементам в текущей точке траектории. В плоском случае задача упрощается и сводится к стабилизации по-

---

**Киселев** Лев Владимирович. Доктор технических наук, главный научный сотрудник, ФГБУН «Институт проблем морских технологий» (ИПМТ) ДВО РАН (Владивосток).

**Медведев** Андрей Владимирович. Научный сотрудник, ИПМТ ДВО РАН.

Статья по докладу на 11-й Российской мультikonференции по проблемам управления, 2018.

зиционных и угловых рассогласований, сформированных с помощью нескольких дальномеров. Подобный способ управления был реализован в различных модификациях в большинстве аппаратов, созданных в ИПМТ ДВО РАН [1–4].

В большинстве случаев гидролокационная съемка осуществляется при движении АНПА на расстоянии от поверхности дна 20–40 м, а при проведении фототелевизионной или профилографической съемки дна – на расстоянии 3–5 м. При этом движение в вертикальной плоскости представляется наиболее сложным в отношении динамики и способов управления. Особенности динамики системы управления в различных режимах движения АНПА рассмотрены в работах [5–7]. При движении в условиях изменчивого рельефа с углами склона до 20–25° и перепадами глубин 20–25 м в ходе гидролокационной, профилографической или фототелевизионной съемки необходимо обеспечить эквидистантную траекторию для двух основных режимов:

- движения вдоль склона с нулевым дифферентом или с дифферентом, соответствующим углу склона;
- огибания препятствия «с ходу» с постоянной или переменной скоростью.

Для минимизации потребляемой при движении энергии предпочтительнее, очевидно, режим с минимальным гидродинамическим сопротивлением, что связано с обеспечением некоторого «оптимального» угла атаки, соответствующего заданной текущей скорости. При движении вдоль склона с нулевым дифферентом возможны большие углы атаки, и расход энергии может быть уменьшен лишь за счет снижения скорости. Точно так же при сложном маневрировании вблизи препятствия трудно обеспечить энергетически оптимальный режим, поскольку при этом отдается приоритет безопасности аппарата, в итоге возникают дополнительные энергетические затраты на движение. Еще одной особенностью задачи является наличие неполной, недостоверной, размытой информации о рельефе, что приводит к целесообразности построения гибридной структуры управления с элементами нечеткой логики. Затронутые вопросы подробно рассматривались в работах [2, 5, 6], и результаты этих исследований применимы к решению задач управления эквидистантным движением при работе АНПА в условиях сложного рельефа дна с огибанием препятствий «с ходу».

Необходимо отметить также некоторые особенности управления, связанные с изменением скорости от нуля до максимального значения. Очевидно, что при увеличении скорости возрастает эффективность гидродинамических сил, и тогда движение сопровождается небольшими углами атаки, что в ряде случаев дает выигрыш в энергозатратах. При малых скоростях падает эффективность гидродинамического сопротивления и, кроме того, ухудшается управляемость по глубине вплоть до возникновения инверсной управляемости. Последний эффект, как показывают расчетные и опытные данные, возникает в диапазоне скоростей движения 0,15–0,20 м/с [2].

Для преодоления сравнительно невысоких одиночных препятствий может быть использовано управление на основе эхолокационных данных системы переднего обзора. При обнаружении препятствия создается момент, пропорциональный соотношению измеряемых дистанций, и осуществляется движение с дифферентом, соответствующим высоте препятствия и дистанции, при которой начинается маневр. При этом по мере приближения к препятствию контролируется некоторая страховочная дистанция, допускающая возможность огибания препятствия «с ходу» без изменения скорости. Режим движения выбирается в зависимости от крутизны склона, которая вычисляется на основе данных от ЭЛС в каждой точке траектории [2, 4].

### Модель динамики АНПА при движении в вертикальной плоскости

В ряде известных работ (например, [7, 8]) для описания динамики подводного аппарата используется обобщенный вектор состояния, компонентами которого служат позиционные и угловые скорости относительно связанных с аппаратом осей вращения. Аналогичная схема применяется и в некоторых зарубежных исследованиях, посвященных в основном установлению кинематических соотношений между действующими на аппарат силами и параметрами движения [9–11]. Для описания динамики АНПА принято использовать «естественные» координаты, непосредственно связанные с характером гидродинамических процессов и формированием алгоритмов управления [1–6, 12, 13]. Учитывая это, представим математическую модель движения АНПА в вертикальной плоскости в виде системы уравнений, в которых отражено взаимодействие всех гидростатических, гидродинамических и управляющих сил:

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

В уравнениях (1) приняты обозначения названных выше работ, в частности: (ОХУ) – локальная система координат, Y – глубина погружения; (Аху) – скоростная (поточная) система координат; (Ах<sub>1</sub>у<sub>1</sub>) – система координат, связанная с корпусом аппарата; v – скорость относительно набегающего потока, ψ – дифферент, α – угол атаки, ϑ – угол траектории; m<sub>x</sub>, m<sub>y</sub>, I<sub>zz</sub> – массы и момент инерции корпуса аппарата с учетом присоединенной жидкости; R<sub>x</sub>, R<sub>y</sub>, M<sub>z</sub> – гидродинамические силы и момент; M<sub>0</sub> – момент остойчивости; T<sub>x1</sub>, T<sub>y1</sub>, M<sub>zупр</sub> – проекции управляющих сил и моментов в системе координат, связанной с корпусом аппарата; P – переменная плавучесть, зависящая, в частности, от глубины погружения аппарата.

Динамические свойства системы, описываемой уравнениями (1), исследовались средствами виртуальной гидродинамики на примере трехмерной компьютерной модели АНПА среднего класса, схематично изображенного на рис. 1. В качестве исходных данных были приняты следующие характеристики и параметры АНПА: геометрические параметры (длина, диаметр и объем корпуса, линейные размеры хвостового оперения, размеры выступающих частей), инерционные параметры (масса аппарата и момент инерции с учетом присоединенных масс и моментов инерции жидкости).

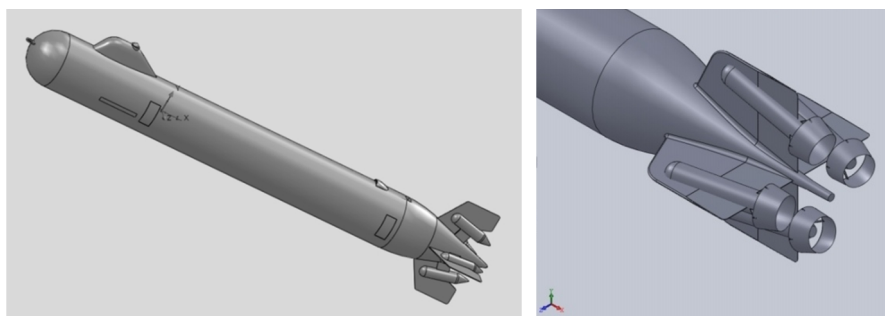


Рис. 1. Представление трехмерной модели АНПА и кормового движительного комплекса

Ниже приведены некоторые технические характеристики АНПА, определяющие его динамические свойства:

- объем  $V$  (водоизмещение),  $\text{м}^3 - 0,49$ ;
- составляющие массы  $m_x, m_y$ , кг – 558, 720;
- момент инерции  $I_{zz}$ ,  $\text{Нмс}^2 - 1360$ ;
- максимальная суммарная продольная тяга  $T_{x1}$ , Н – 221;
- максимальный управляющий момент  $M_{z \text{упр}}$ , Нм – 55;
- максимальный момент остойчивости  $M_0 - 55$  Нм.

Для определения гидродинамических характеристик и компонент вектора состояния АНПА использовался пакет прикладных программ, включающий следующие процедуры:

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

Результаты расчета гидродинамических воздействий  $R_x(\alpha)$ ,  $R_y(\alpha)$ ,  $M_z(\alpha)$  в диапазоне углов атаки  $\pm 60^\circ$ , отнесенных к величине скорости набегающего потока, приведены на рис. 2.

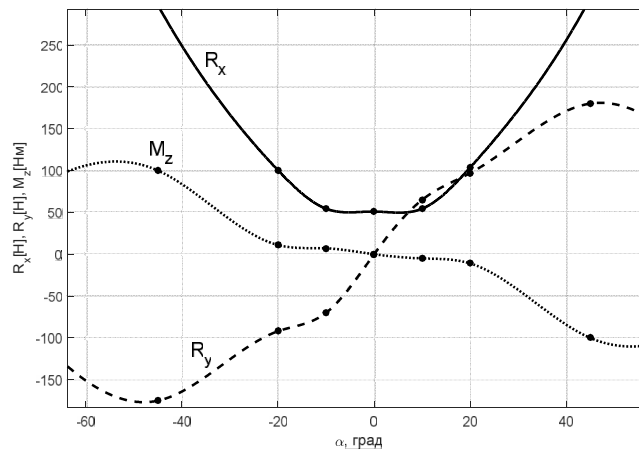


Рис. 2. Графические зависимости сил вязкого сопротивления от угла атаки

Качество управления зависит от эффективности исполнительных органов с учетом их конструктивных особенностей и ограничений на параметры управляющих воздействий. В традиционной конфигурации движительный комплекс представляет собой гребные маршевые движители, ориентированные попарно в плоскостях симметрии аппарата, и подруливающие движители с вертикальной тягой. Такая схема позволяет создать произвольные упоры и моменты за счет изменения составляющих этих сил. Для маневренного универсального аппарата, способного выполнять различные режимы движения, включая позиционирование, зависание, старт-стопное подруливание и др., применяется более эффективная установка с использованием двух групп движителей: четырех (трех) кормовых маршевых и двух (трех) подруливающих, распределенных по длине корпуса аппарата. Подруливающие движители обычно служат вспомогательным средством при осуществлении экстренных или некоторых специальных

режимов при позиционировании относительно заданного положения. Далее рассматривается поступательное движение с преодолением препятствий «с ходу», т.е. без использования режима позиционирования. В этом случае эффективность подруливающих движителей может проявляться в приложении дополнительных усилий (создании упоров<sup>1</sup> и моментов) для преодоления очень крутых и высоких препятствий. Ограничившись более простой задачей, представим управляющие воздействия в вертикальной плоскости при использовании кормовой секции движителей в виде [1, 2]:

$$T_{x1} = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \cos \gamma, T_{y1} = (T_1 - T_2) \sin \gamma = T_{y1}^{\max} \text{sat}(U_y / T_{y1}^{\max}), M_z^{\text{упр}} = T_{y1} L_k. \quad (2)$$

В формулах (2) приняты обозначения:  $T_1, T_2$  – упоры движителей вертикального канала;  $T_3, T_4$  – упоры движителей горизонтального канала;  $T^{\max}$  – максимальный упор;  $L_k$  – плечо кормовой секции;  $\gamma$  – угол наклона кормовых движителей относительно продольной оси аппарата;  $U_y$  – управляющая функция для кормовых движителей;  $\text{sat}$  – линейная функция с ограничением по максимальному значению величины.

Примем для сравнения два варианта структуры исполнительных органов:

- кормовой движительный комплекс (КДК), обеспечивающий управление скоростью, глубиной (расстоянием до дна) и курсом;
- движительный комплекс, обеспечивающий управление скоростью и курсом, и устройство маятникового типа для создания управляющего момента в вертикальной плоскости, эквивалентного управляемому моменту остойчивости.

Отметим некоторую особенность, связанную с использованием маятникового устройства для управления угловым положением аппарата. Идея такого управления основана на аналогии, связывающей момент остойчивости корпуса аппарата  $M_0 = \rho V h_0 \sin \psi$  (где  $\rho$  – плотность воды,  $V$  – объем аппарата,  $h_0$  – метацентрическая высота) и момент, создаваемый тяжелым маятником. Пусть маятник, имеющий вес  $P_m$  и плечо  $L_m$ , свободно подвешен в кормовой части аппарата так, чтобы в нейтральном свободном положении дифферент аппарата отсутствовал. С помощью механизма привода маятник поворачивается на некоторый угол  $\delta$  от нормальной оси аппарата, которая составляет с нормалью к горизонту угол дифферента  $\psi$ . Угол отклонения маятника от вертикали  $\bar{\delta} = \delta \pm \psi$ , где повороту маятника против часовой стрелки соответствует знак «+», по часовой стрелке – знак «-» (рис. 3).

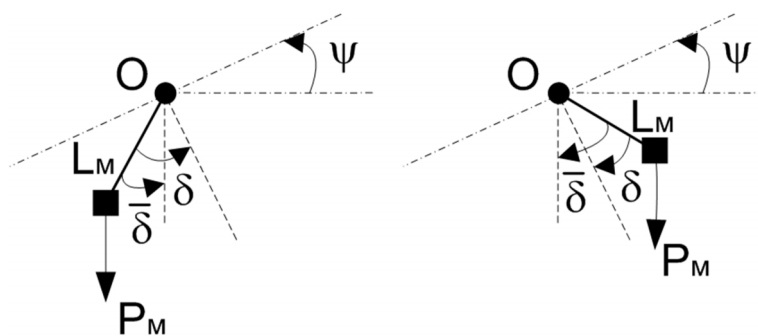


Рис. 3. Схема маятникового устройства

<sup>1</sup> Под «упорами» здесь понимаются тяги (силы), создаваемые движителями (гребными винтами).

Создаваемый маятником момент  $M_{зупр} = P_M L_M \sin(\delta \pm \psi)$  эквивалентен перемному моменту остойчивости, что и позволяет интерпретировать этот эффект как управление с помощью изменения момента остойчивости. Привод, поворачивающий маятник на заданный угол, может быть представлен апериодическим звеном, на вход которого поступает ограниченный по величине управляющий сигнал, соответствующий заданной величине скорости поворота двигателя (рис. 4).

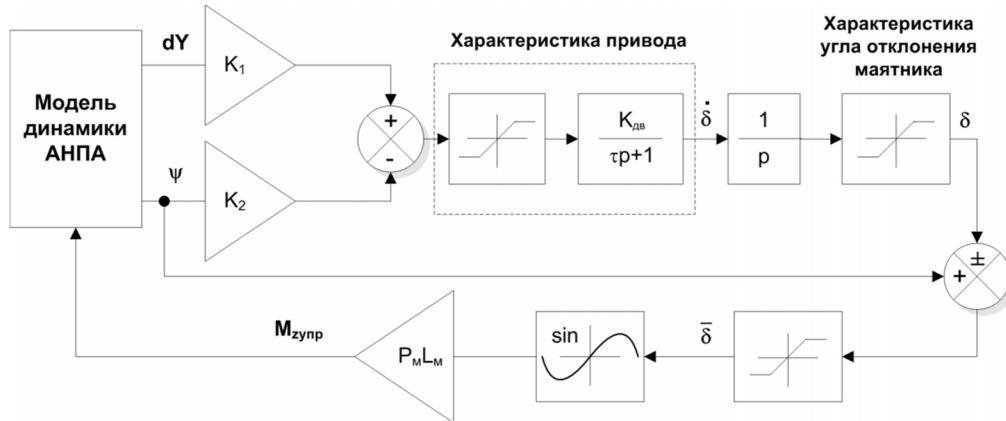


Рис. 4. Структурная схема системы управления поворотом маятника

В приведенной на рис. 4 структурной схеме приняты следующие обозначения:  $dY$  – позиционное рассогласование;  $K_1$ ,  $K_2$  – коэффициенты усиления задающего сигнала;  $K_{дв}$ ,  $\tau$  – коэффициент усиления и постоянная времени поворотного двигателя. Конкретно были приняты следующие значения параметров системы:  $K_1 = 10 \text{ м}^{-1}$ ,  $K_2 = 100 \text{ рад}^{-1}$ ,  $K_{дв} = 0,5 \text{ рад}^{-1}$ ,  $\tau = 1,5 \text{ с}$ ,  $|\delta| \leq \pi/6$ ,  $|\dot{\delta}| \leq \pi/3$ ,  $P_M = 200 \text{ Н}$ ,  $L_M = 0,2 \text{ м}$ .

При исследовании динамических процессов в системе управления использовалась имитационная модель, схема которой приведена на рис. 5, где ДРК – движительно-рулевой комплекс.



Рис. 5. Функциональная схема динамической модели АНПА

Работу динамической модели инициирует звено «модель АНПА».

### Динамика системы управления АНПА при эквидистантном движении вблизи дна

Динамические свойства системы управления АНПА можно оценить, анализируя качество переходных процессов при отработке заданного начального рассогласования по глубине (рис. 6). Далее при анализе динамических процессов будем рассматривать два варианта управления: вариант 1 – управление с помощью традиционной схемы КДК, вариант 2 – комбинированное управление с использованием маятникового устройства. Управление по глубине осуществляется на основе ПИД-регулятора с ограничениями на величину управляющих воздействий, как это принято в системах управления движением АНПА [2–6].

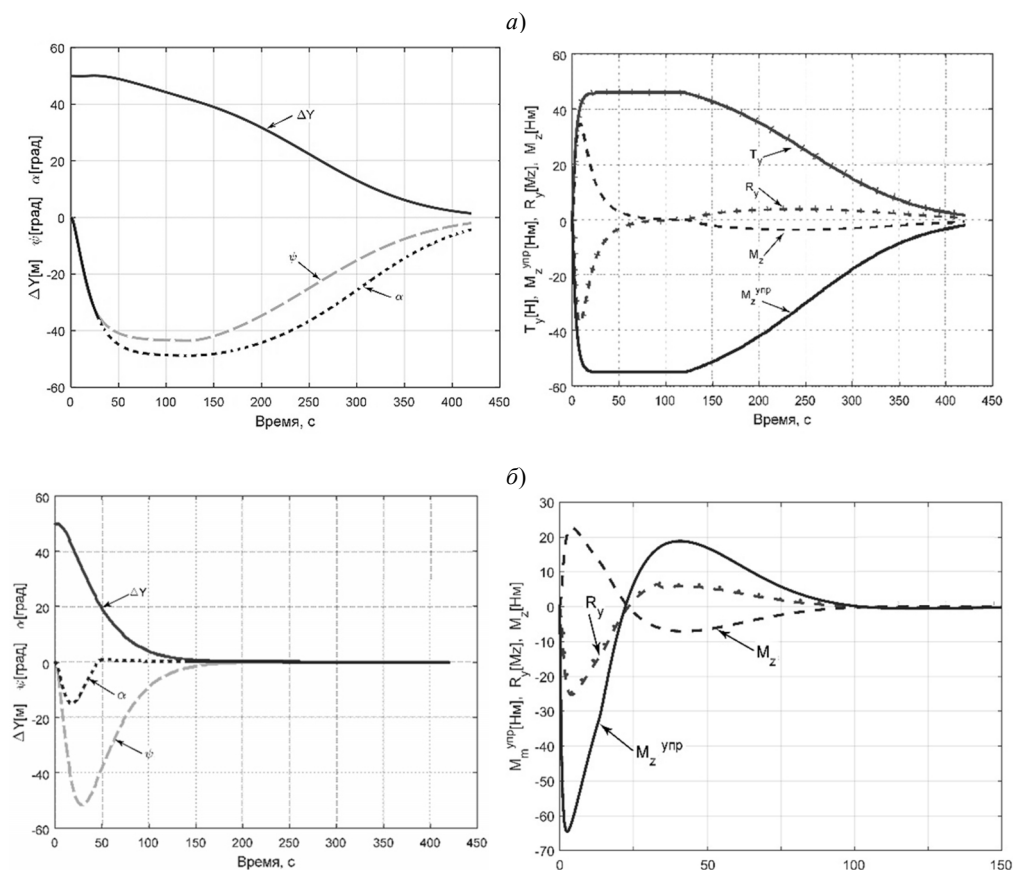


Рис. 6. Переходные процессы (слева) и действующие силы (справа) с начальным рассогласованием по глубине 50 м с двумя вариантами исполнительных органов: а – вариант 1, б – вариант 2

Отметим некоторые особенности динамики системы в двух представленных вариантах управления с идентичными параметрами ПИД-регуляторов. Динамические характеристики переходных процессов в первом варианте существенно зависят от величины вертикальной управляющей силы, принимающей в начальный момент максимальное значение. Этим обусловлено возникновение значительных (более 40°) углов атаки при сравнительно малой величине вертикальной составляющей скорости (0,1-0,2 м/с). Вследствие больших углов атаки силы вязкого сопротивления и, соответственно, управляющие воздействия также достаточно велики, что, естественно, приводит к увеличению энергозатрат на

движение. В варианте с маятниковым устройством управление угловым движением осуществляется с помощью момента без вертикальной составляющей силы. Это не приводит к образованию больших углов атаки, силы сопротивления невелики, и переходной процесс быстро затухает. Данный вариант управления имеет существенное преимущество в отношении качества переходных процессов при отработке заданных рассогласований по глубине.

Оценим характер динамических процессов при эквидистантном движении вблизи дна. Зададим профиль рельефа дна плоской кривой с «вершинами» до 25 м и углами склона до  $20^\circ$ . Если в рассматриваемой модели профиль рельефа дна известен и может быть при этом задан функцией  $Y(x)$ , то уравнение эквидистанты, отстоящей от поверхности дна на величину  $Y_{зад}$ , будет иметь вид  $Y(x) - Y_{зад} = 0$ . Реально данные о профиле рельефа дна формируются в процессе движения на основе эхолокационных данных, и задача состоит в формировании управляющих воздействий, обеспечивающих движение по траектории, близкой к некоторой «прогнозируемой» эквидистанте относительно дна. Фактически это означает стабилизацию высоты от дна по вертикали или по нормали к поверхности дна с использованием данных ЭЛС.

Необходимо учитывать особенности управления, связанные с определением эквидистанты и ее измерениями в процессе движения. Кратчайшее расстояние от центра масс аппарата до дна при переменном рельефе можно определить одной из двух величин – высотой  $h$  по вертикали или  $\tilde{h}$  по нормали к поверхности дна. Различие между этими двумя величинами зависит от дифферента аппарата и крутизны склона, относительно которого осуществляется движение. Задача стабилизации движения по эквидистанте от дна заключается в том, чтобы траектория аппарата с определенной точностью воспроизводила профиль рельефа с удержанием заданного расстояния до дна. Это означает, что при движении вдоль склона переменной крутизны на заданном расстоянии от дна необходимо выдерживать угол траектории  $\vartheta$ , равный текущей величине угла склона. Если выполняется это требование, то движение происходит с некоторым углом атаки. При относительно пологом рельефе дна (при малых углах атаки) угловое управление сводится к удержанию дифферента, соответствующего крутизне склона.

Для ориентирования АНПА относительно рельефа дна и формирования управления по эквидистанте используется трехканальная ЭЛС, в которой один эхолокатор ориентирован вниз (измеряемое расстояние  $d_1$ ), другой – наклонно вперед под углом  $\varphi$  (измеряемое расстояние  $d_2$ ), третий – вперед по ходу движения ( $d_3$ ). Измеряемое расстояние до дна и расстояние по нормали связаны тригонометрическим выражением  $\tilde{h} = d_1 \cos(\psi - \theta)$ , где  $\theta$  – величина угла склона (рис. 7). Приблизительно эта величина определяется при помощи следующего соотношения, связывающего измеряемые расстояния до дна, дифферент и углы между лучами дальнометров  $\varphi_i$  ( $i = 1, 2$ ):

$$\theta = \psi + (\varphi_1 + \varphi_2) - \arctg \left[ (d_2 \sin \varphi_1) / (d_1 - d_2 \cos \varphi_1) \right]. \quad (3)$$

Далее в расчетах для конкретности принято  $\varphi_1 = \varphi_2 = \pi/4$ , так что

$$\theta = \psi + \pi/2 - \arctg \left[ d_2 / (d_1 \sqrt{2} - d_2) \right].$$

Для стабилизации устойчивого движения аппарата по эквидистанте с огибанием препятствия формируется управляющий момент, зависящий от позицион-



ных рассогласований по двум эхолотационным каналам и угла дифферента, соответствующего величине текущего угла склона

$$M_z^{упр} = K_{d1}(d_1 - d_1^{зад}) + K_{d2}(d_2 - d_2^{зад}) + K_\theta(\theta - \psi), \quad (4)$$

где  $d_1^{зад}, d_2^{зад}$  – заданные значения дистанций до дна в двух направлениях, причем  $d_2^{зад} = d_1^{зад} \cos \varphi_1$  или конкретно  $d_2^{зад} = d_1^{зад} \sqrt{2}$  при  $\varphi_1 = \pi/4$ ;  $K_{d1}, K_{d2}, K_\theta$  – настраиваемые параметры управления, выбором которых обеспечивается требуемое качество динамических процессов.

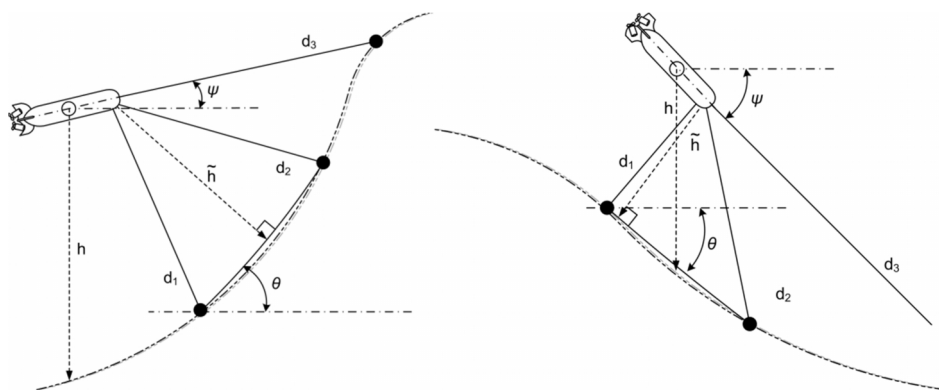


Рис. 7. Схема ориентации АНПА относительно профиля рельефа дна

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

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

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

Результаты моделирования движения по эквидистантной траектории для двух вариантов исполнительных органов приведены на рис. 9–13. Представленные на рис. 8 графики иллюстрируют процесс отслеживания профиля рельефа дна при движении по эквидистанте при следующих значениях задаваемых параметров:  $d_1^{зад} = 5$  м,  $d_2^{зад} = 5\sqrt{2}$  м,  $d_3^{зад} = 50$  м,  $K_{d1} = K_{d2} = 10 \text{ м}^{-1}$ ,  $K_\theta = 100 \text{ рад}^{-1}$ .

Характер движения по эквидистанте на малом расстоянии от дна идентичен в обоих вариантах управления, и незначительные отличия наблюдаются только при огибании достаточно высоких и крутых препятствий. Эти отличия обусловлены в основном разницей в изменении угла атаки, а также способом определения величины угла склона в соответствии с выражением (3). При этом необходимо принимать во внимание, что с помощью дальномеров определяется «упрежденная» по ходу движения крутизна склона, которая, очевидно, отличается от крутизны склона «под килем» аппарата (рис. 9). На представленном рисунке  $\theta$  – заданная (модельная) величина угла склона рельефа дна «под килем» аппарата;  $\theta_\pi$  – величина, определенная в соответствии с выражением (3). В от-

дельных случаях эти величины совпадают, что, очевидно, является следствием выбранного закона управления вида (4) при углах дифферента, отличных от значений вычисленного угла склона. Следует отметить, что определение величины  $\theta(x)$  основано на использовании дискретных дальномерных данных, содержащих погрешности вычислений в виде характерного «шума».

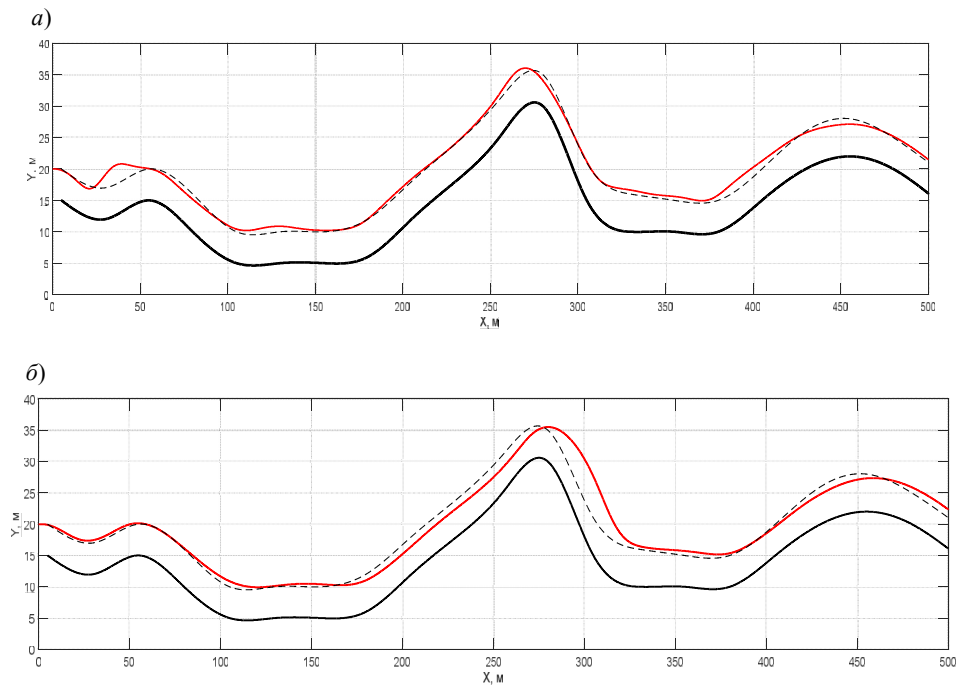


Рис. 8. Профиль рельефа дна (черная линия), заданная эквидистанта (пунктирная линия) и два варианта ее осуществления (красная линия): а – вариант 1, б – вариант 2

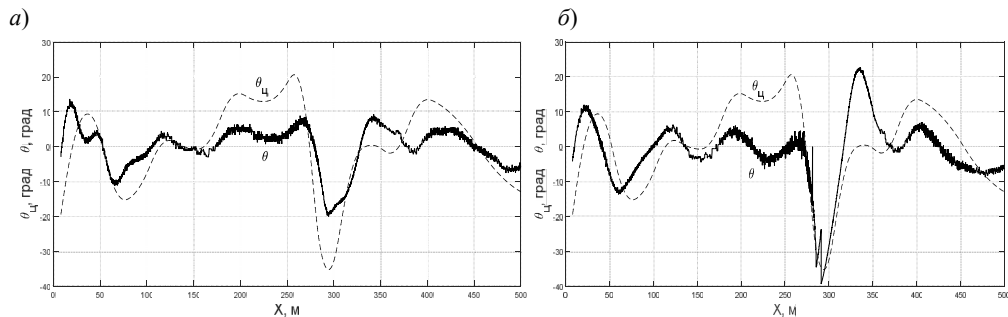


Рис. 9. Модельная и измеренная («прогнозная») величина угла склона рельефа дна по маршруту движения: а – вариант 1, б – вариант 2

При отслеживании заданной эквидистанты горизонтальная и вертикальная составляющие скорости движения  $V_x$ ,  $V_y$  изменяются в соответствии с данными об ориентировании аппарата относительно профиля рельефа дна (рис. 10, а, б). Можно отметить, что в обоих вариантах управления горизонтальная составляющая скорости изменяется в пределах 0,8–1,1 м/с в зависимости от препятствий по ходу движения. Вертикальная составляющая скорости в обоих вариантах управления изменяется более интенсивно в диапазоне  $-0,5$ – $0,4$  м/с в зависимости от профиля рельефа дна. При маневрировании аппарата с огибанием пре-

пятствий происходит взаимозависимое изменение гидродинамических и управляющих воздействий  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $M_z$ ,  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $M_z^{упр}$  (рис. 11, 12). Соответствующее изменение угловых величин представлено на рис. 13, причем некоторые различия в динамике системы для двух вариантов управления обусловлены различиями в изменении составляющих скорости движения и, соответственно, в изменении угловых величин, главным образом угла атаки. С характером изменения всех перечисленных величин связаны энергозатраты на движение. Несложные вычисления показывают, что мощность, затрачиваемая на движение без учета электромеханических характеристик исполнительных органов, составляет в первом варианте управления 58,5 Вт, во втором варианте – 53,7 Вт. Очевидно, что при длительной работе АНПА вариант управления с маятниковым устройством дает значительную экономию энергии, затрачиваемой при движении.

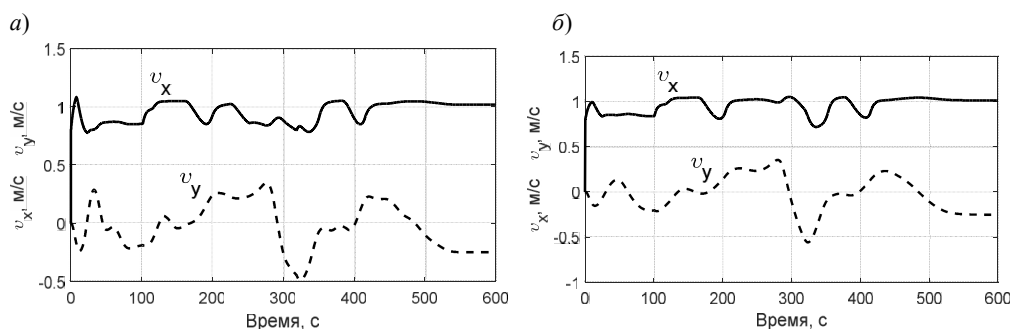


Рис. 10. Изменение составляющих скорости движения  $V_x$ ,  $V_y$  при заданной скорости установившегося движения  $V = 1$  м/с: *a* – вариант 1, *б* – вариант 2

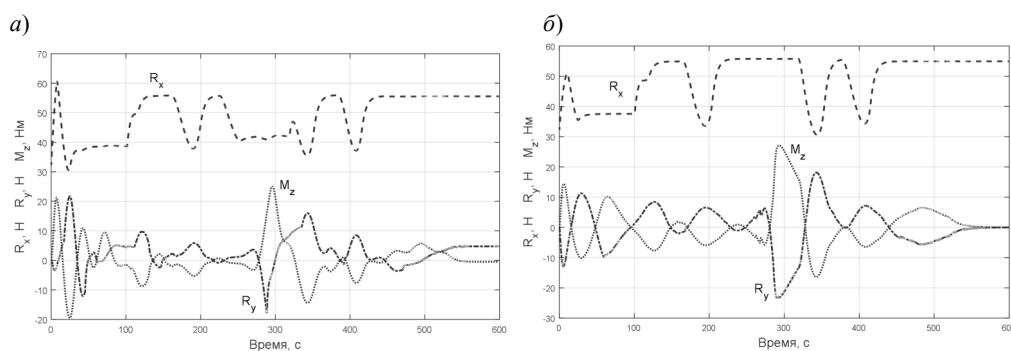


Рис. 11. Изменение гидродинамических воздействий: *a* – вариант 1, *б* – вариант 2

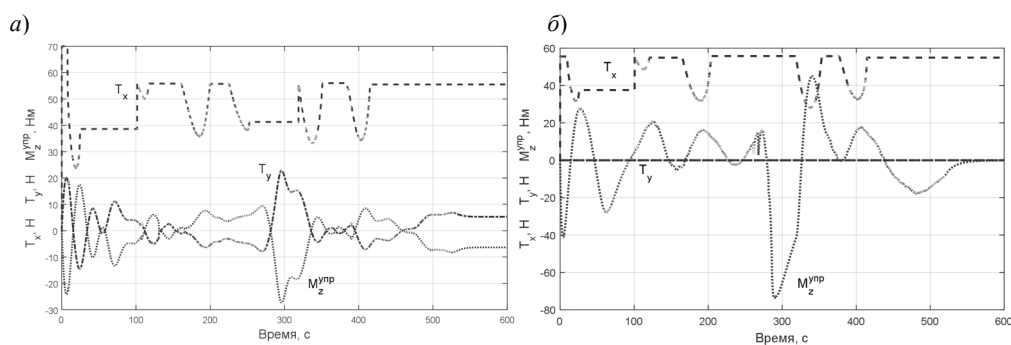
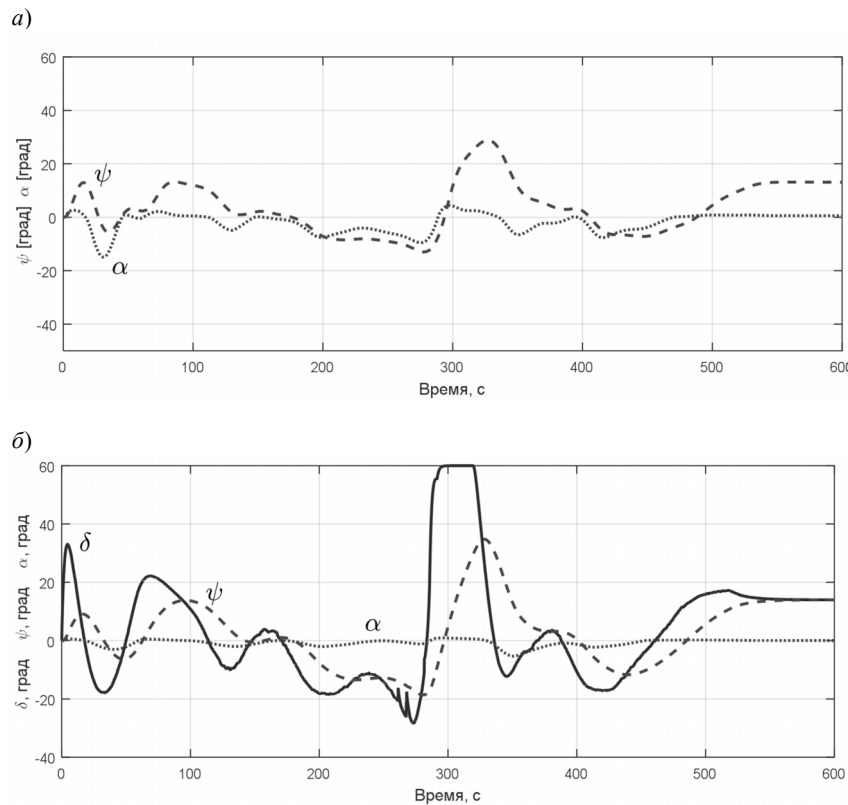


Рис. 12. Изменение управляющих воздействий: *a* – вариант 1, *б* – вариант 2

Рис. 13. Изменение угловых величин: *a* – вариант 1, *б* – вариант 2

### Заключение

В заключение сделаем выводы, следующие из результатов исследования.

1. Принятые модели и алгоритмы управления движением по эквидистанте относительно рельефа дна с использованием двух вариантов исполнительных органов работоспособны в условиях рельефа дна умеренной сложности и позволяют достаточно точно отслеживать эквидистанту «с ходу» на безопасном расстоянии от возможных препятствий.

2. Огибание препятствий осуществляется путем создания управляющих воздействий, пропорциональных измеренным позиционным рассогласованиям и угловому положению АНПА относительно склона рельефа дна. При этом управление с помощью кормового движительного комплекса при маневрировании в переменном рельефе сопровождается возникновением достаточно больших углов атаки. Последнее приводит к некоторому увеличению сил гидродинамического сопротивления и, соответственно, к увеличению энергозатрат при движении. В системе управления с маятниковым устройством управление осуществляется путем создания маятникового момента без вертикальной составляющей упора, что позволяет уменьшить энергозатраты при движении. Кроме того, в этом случае управляющий момент эквивалентен моменту остойчивости аппарата, что обеспечивает баланс требований к устойчивости и точности управления при любых изменениях вектора состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В. и др. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981, 223 с.
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. и др. Подводные робототехнические комплексы. Системы, технологии, применение / отв. ред. Л.В.Киселев. Владивосток: Дальпресс, 2018. 367 с.
4. Киселев Л.В. Код глубины. Владивосток: Дальнаука, 2012. С. 331.
5. Inzartsev, A.V., Kiseljov, L.V., Medvedev, A.V., Pavin, A.M., Autonomous Underwater Vehicle Motion Control during Bottom Objects and Hard-to-Reach Areas Investigation, *Motion Control*. Vienna: InTech, 2010, pp. 207–228.
6. Kiselev, L.V., Medvedev, A.V., Dynamic Models for Trajectory Survey and Mapping of Local Physical Fields of the Ocean with Autonomous Underwater Vehicle, *Proc. of Intern. Symposium on Underwater Technology (UT 2017)*, Busan, South Korea, 21-24 Feb. 2017, IEEE Xplore.
7. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973. 209 с.
8. Ястребов В.С., Игнатьев М.Б., Кулаков Ф.М., Михайлов В.В. Подводные роботы. Л.: Судостроение, 1977. С. 363.
9. Siciliano, B., Khatib, O., Groen F., Springer Tracts in Advanced Robotics, 2006, vol. 2, pp. 15–77.
10. Saacidinezhad, A., Dehghan A.A., Dehghan Manshadi, M., Experimental investigation of hydrodynamic characteristics of a submersible vehicle model with anon-axisymmetric nose in pitch maneuver, *Ocean Engineering*, 100 (2015), pp.26–34.
11. Geisbert, J.S., Hydrodynamic Modeling for Autonomous Underwater Vehicles Using Computational and Semi-Empirical Methods, Blacksburg, Virginia, 2007, 87 p.
12. 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.
13. Киселев Л.В., Медведев А.В. О параметрических соотношениях гидродинамики и устойчивости движения автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. 2013. №1 (15). С. 17–22.

---

Kiselev, L.V. and Medvedev, A.V. (Institute of Marine Technology Problems, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences)  
Selected Features of Autonomous Underwater Robot Dynamics under Near-Bottom Equidistant Motion Control, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2019, vol. 27, no. 1 (104), pp. 93–106.

**Abstract.** Search and survey missions of an autonomous underwater robot are usually associated with motion along equidistant trajectories near the bottom. The most difficult problem here is to control motion in a vertical plane in presence of obstacles in the bottom relief along the motion route. When the obstacles are detected using a multi-channel front-viewing echolocation system, equidistant motion of the vehicle is provided with tracking of the bottom relief profile. The dynamic model of motion with specific requirements for the structure and control parameters is studied. Comparative analysis of the dynamic properties of control system depending on the design and functional features of the actuating elements and the range-measuring echolocation system is presented.

**Key words:** underwater robotics, autonomous underwater vehicles (robots), motion control, dynamic models, bottom relief.

REFERENCES

1. Ageev, M.D., Kasatkin, B.A., Kiselev, L.V., et al., *Avtomaticheskie podvodnye apparaty* (Automatic Underwater Vehicles), Leningrad: Sudostroyeniye, 1981.
2. Ageev, M.D., Kiselev, L.V., Matvienko, Yu.V., et al., *Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii* (Autonomous Underwater Robots. Systems and Technologies), Moscow: Nauka, 2005.

3. **Inzartsev, A.V., Kiselev, L.V., Kostenko, V.V. et al.**, *Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы. Sistemy, tekhnologii, primeneniye* (Underwater Robotic Complexes. Systems, Technologies, Applications), Vladivostok: Dal'press, 2018.
4. **Kiselev, L.V.**, *Kod glubiny* (Code of Depth), Vladivostok: Dal'nauka, 2012.
5. **Inzartsev, A.V., Kiselev, L.V., Medvedev, A.V. and Pavin, A.M.**, Autonomous underwater vehicle motion control during bottom objects and hard-to-reach areas investigation, *Motion Control*, Vienna: InTech, 2010, pp. 207–228.
6. **Kiselev, L.V., and Medvedev, A.V.**, Dynamic models for trajectory survey and mapping of local physical fields of the ocean with autonomous underwater vehicle, *Proc. of Intern. Symposium on Underwater Technology (UT 2017)*, Busan, South Korea, 21-24 Feb. 2017, IEEE Xplore.
7. **Pantov, E.N., Makhin, N.N., and Sheremetov, B.B.** *Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov* (Fundamental Theory of Underwater Vehicles Motion), Leningrad: Sudostroyeniye, 1973.
8. **Yastrebov, V.C., Ignat'yev, M.V., Kulakov, F.M., and Mikhaylov, V.V.**, *Podvodnye roboty* (Underwater Robots), Leningrad: Sudostroyeniye, 1977.
9. **Antonelli, G.**, Underwater Robots. Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems, *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2006, vol. 2.
10. **Saeidinezhad, A., Dehghan, A.A., and Manshadi, M.D.**, Experimental investigation of hydrodynamic characteristics of a submersible vehicle model with anon-axisymmetric nose in pitch maneuver, *Ocean Engineering*, 2015, no. 100, pp. 26–34.
11. **Geisbert, J.S.**, Hydrodynamic Modeling for Autonomous Underwater Vehicles Using Computational and Semi-Empirical Methods, Blacksburg, Virginia, 2007.
12. **Kiselev, L.V., and Medvedev, A.V.**, Comparative analysis and optimization of dynamic properties of autonomous underwater robots of different projects and configurations, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2012, no. 1(13), pp. 24–35.
13. **Kiselev, L.V., and Medvedev, A.V.**, On parametric relationships of hydrodynamics and motion stability of autonomous underwater robot, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2013, no. 1(15), pp. 33–39.

Материал поступил 11.12.2018