

УДК 531.31, 517.912

© *Е. В. Ветчанин, Ю. Л. Караваяев, А. А. Калинин, А. В. Клековкин, Е. Н. Пивоварова*

## МОДЕЛЬ БЕЗВИНТОВОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА <sup>1</sup>

Данная статья посвящена созданию модели подводного робота, приводящегося в движение с помощью расположенных внутри него роторов. Подобная конструкция не имеет подвижных элементов, взаимодействующих с окружающей средой, что минимизирует негативное воздействие на нее и повышает бесшумность движения робота в жидкости. Несмотря на многочисленные дискуссии о возможности и эффективности движения за счет перемещения внутренних масс, большое количество работ, опубликованных в последнее время, подтверждает актуальность исследований. В статье представлен обзор работ, направленных на изучение движения на основе перемещения внутренних масс. Предложена конструкция безвинтового подводного робота, перемещающегося за счет вращения внутренних роторов, для проведения теоретических и экспериментальных исследований. При проведении теоретических исследований модель представляет собой полый эллипсоид с расположенными внутри тремя роторами, оси вращения которых взаимно ортогональны. Для предложенной модели безвинтового подводного робота получены уравнения движения в виде классических уравнений Кирхгофа.

*Ключевые слова:* мобильный робот, безвинтовой подводный робот, движение в идеальной жидкости.

### Введение

История подводных аппаратов началась с подводных лодок, которые появились в начале XX века и имели исключительно военное назначение. Первые подводные аппараты были обитаемыми, и только в начале 90-х годов появились автономные необитаемые подводные аппараты, которые имеют все признаки робототехнических систем, а именно автономную систему энергообеспечения, автономную систему управления с функциями дистанционного управления, беспроводной канал связи. Подробный обзор конструкций и особенностей управления подводными роботами можно найти в работах [1–7].

Несмотря на активное развитие подводной робототехники, при создании автономных подводных роботов необходимо решить ряд важных задач:

- 1) выбор способа передвижения подводного робота, включая разработку адекватной модели движения;
- 2) разработка навигационной системы подводного робота для определения положения и параметров движения;
- 3) разработка надежного способа обмена и хранения информации при движении подводного робота в реальных условиях.

В данной работе мы сконцентрируемся на задачах первой группы, а обзор работ, посвященных остальным задачам, можно найти в [8–15].

На сегодняшний день известны три основных способа перемещения: движения за счет вращающегося винта (винтов) [16]; перемещение с использованием принципов движения морских существ (например, рыбы, медузы, змеи) [17]; движение за счет перемещения внутренних масс и/или создания кинетического момента внутренними роторами. Возможна также комбинация

---

<sup>1</sup>Теоретические исследования выполнены Пивоваровой Е.Н. в рамках гранта РФФИ 15–08–09093-а. Экспериментальные результаты получены в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 14–19–01303).

указанных способов. Например, известно об использовании вращающихся роторов для стабилизации движения подводного робота, приводимого в движение винтом [15]. Третий способ ввиду сложности алгоритмов управления и меньшей эффективности по сравнению с другими способами менее распространен. Однако его использование для передвижения подводных роботов позволяет исключить вмешательство в окружающую среду, так как все исполнительные механизмы расположены внутри герметичной оболочки и не контактируют с жидкостью. В то же время движение подводного робота за счет внутренних масс остается малоизученным. Хотя такой принцип движения используется и при движении сухопутных роботов [18–20].

В работе [21] рассматривается робот, состоящий из корпуса и двух подвижных внутренних масс, которые перемещаются относительно корпуса по прямолинейным направляющим. Взаимодействие робота со средой осуществляется только за счет четырех опорных поплавков с изменяемым углом наклона относительно вертикали. Движение происходит за счет изменения силы трения вдоль продольной оси корпуса при повороте поплавков. Разработана математическая модель и проведено численное моделирование, позволившее изучить управляемые движения робота на примере прямолинейного и вращательного движения.

Модель безвинтового подводного робота, приводящегося в движение за счет перемещения внутренних масс (изменения положения центра масс системы), описана в работе [22]. Смещение центра масс происходит за счет двух эксцентриков, приводимых в движение одним электродвигателем.

В работе [23] рассматривается задача о движении тела в вязкой жидкости за счет перемещения внутренних масс, при котором внешняя оболочка тела остается неизменной. Приведена математическая модель, построенная на гидродинамических уравнениях Навье–Стокса. В результате численного моделирования показано существенное влияние сил и момента вязкого сопротивления на траекторию движения, выявлены отличия движения тела в вязкой жидкости по сравнению с идеальной. На основе полученных результатов в работе [24] решена задача оптимального управления движением тела по заданной траектории за счет перемещения внутренних масс с применением гибридного генетического алгоритма. В результате получены аппроксимационные зависимости для сил, действующих на тело.

Исследование характеристик движения тела с переменным распределением массы в трехмерной вязкой жидкости проведено в работе [25]. Показана возможность перемещения тела в произвольном направлении, а также возможность преодоления силы тяжести телом с плавучестью, близкой к нулевой.

Для проверки выдвинутых в указанных работах теоретических гипотез мы разработали экспериментальную модель подводного робота, перемещающегося за счет внутренних роторов. Далее приведем уравнения движения подводного робота, представленного в виде тела с тремя внутренними роторами.

## § 1. Уравнения движения и первые интегралы

Рассмотрим систему, состоящую из жесткой внешней оболочки и трех внутренних роторов (рис. 1). Геометрический центр системы совпадает с центром сферической части оболочки.

Будем полагать, что конструкция удовлетворяет ряду условий.

1. Оболочка является однородной, положение ее центра масс совпадает с геометрическим центром оболочки.
2. Все роторы одинаковы, осесимметричны, и оси вращения совпадают с их осями симметрии, то есть вращение не изменяет распределение масс системы.
3. Оси вращения роторов взаимно перпендикулярны, а их угловые скорости являются заданными функциями времени  $\omega_k(t)$ ,  $k = 1, 2, 3$ .

Выберем подвижную систему координат  $O_1e_1e_2e_3$ , жестко связанную с оболочкой, так что оси совпадают с главными осями инерции оболочки. Обозначим через  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{\Omega}$  скорость центра

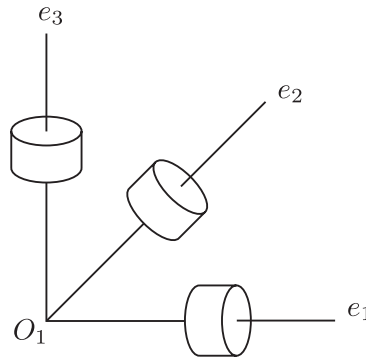


Рис. 1. Расположение роторов

оболочки и его угловую скорость (все векторы, если не оговорено обратное, проецируются на подвижные оси).

Определим дополнительно неподвижную систему координат  $Oxyz$  и обозначим через  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  координаты геометрического центра оболочки в этих осях. Обозначим также через  $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}$  орты неподвижных осей  $Oxyz$ , спроецированные на подвижные оси  $e_1, e_2, e_3$ ; тогда ортогональная матрица

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{pmatrix} \in SO(3)$$

характеризует ориентацию тела, а пара  $(\mathbf{r}, \mathbf{Q})$  однозначно определяет конфигурацию системы. Таким образом, конфигурационное пространство системы шестимерно и представляет собой  $\mathbb{R}^3 \times SO(3)$ .

Обозначим через  $m_s$  массу оболочки, через  $\mathbf{I}_s$  — ее центральный тензор инерции, через  $\boldsymbol{\Lambda} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Lambda}_1 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\Lambda}_2 \end{pmatrix}$  — матрицу коэффициентов присоединенных масс в системе  $Oe_1e_2e_3$ , где  $\boldsymbol{\Lambda}_1$  — тензор присоединенных масс,  $\boldsymbol{\Lambda}_2$  — тензор присоединенных моментов инерции. Тогда выражение для кинетической энергии оболочки примет вид

$$T_s = \frac{1}{2}m_s(\mathbf{V}, \mathbf{V}) + \frac{1}{2}(\mathbf{I}_s\boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}),$$

а выражение кинетической энергии жидкости —

$$T_f = \frac{1}{2}(\boldsymbol{\Lambda}_1\mathbf{V}, \mathbf{V}) + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\Lambda}_2\boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}).$$

Обозначим через  $m_R$  массу ротора, через  $\mathbf{I}_k$  — центральный тензор инерции  $k$ -го ротора, записанный в системе координат  $O'e_1e_2e_3$ ; через  $\mathbf{n}_k$  — орт оси вращения  $k$ -го ротора, неподвижный в системе  $O'e_1e_2e_3$ ; через  $\mathbf{r}_k$  — радиус-вектор центра масс  $k$ -го ротора, неподвижный в системе  $O'e_1e_2e_3$ . Тогда кинетическая энергия  $k$ -го ротора примет вид

$$T_k = \frac{1}{2}m_R(\mathbf{V} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_k, \mathbf{V} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_k) + \frac{1}{2}(\mathbf{I}_k(\boldsymbol{\Omega} + \omega_k\mathbf{n}_k), \boldsymbol{\Omega} + \omega_k\mathbf{n}_k).$$

Суммарная кинетическая энергия всей системы с учетом того, что оси роторов задаются собственными векторами их тензоров инерции, то есть  $\mathbf{I}_k\mathbf{n}_k = i\mathbf{n}_k$ , примет вид

$$T = T_f + T_s + \sum_{k=1}^3 T_k = \frac{1}{2}(\mathbf{I}\boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}) + (\mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{V}) + \frac{1}{2}(\mathbf{C}\mathbf{V}, \mathbf{V}) + (\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{K}(t)) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 i\omega_k^2(t), \quad (1.1)$$

где  $\mathbf{I}$  — тензор инерции всей системы, вычисленный относительно геометрического центра оболочки; матрицы  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  зависят от распределения масс и формы оболочки;  $\mathbf{K}(t) = \sum_{k=0}^3 i\omega_k(t)\mathbf{n}_k$  — вектор гиростатического момента. Матрицы  $\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  имеют вид

$$\mathbf{I} = \mathbf{\Lambda}_2 + \mathbf{I}_s + \sum_{k=1}^3 \mathbf{I}_k + \frac{1}{2}m_R \sum_{k=1}^3 (\mathbf{r}_k^2 \mathbf{E} - \mathbf{r}_k \otimes \mathbf{r}_k), \quad \mathbf{C} = m\mathbf{E} + \mathbf{\Lambda}_1,$$

$$\mathbf{B} = m \begin{pmatrix} 0 & z_c & -y_c \\ -z_c & 0 & x_c \\ y_c & -x_c & 0 \end{pmatrix}, \quad m = m_s + 3m_R,$$

где  $x_c, y_c, z_c$  — компоненты радиус-вектора  $\mathbf{r}_c$  центра масс системы.

**Замечание 1.** Общее число параметров матриц  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{I}$  равно 21. С помощью подходящего выбора точки  $O_1$  и ориентации осей  $O_1e_1e_2e_3$  матрицу  $\mathbf{I}$  можно привести к диагональному виду,  $\mathbf{B}$  — к симметрическому, а общее число параметров будет равно 15 [26]. Исследования, которые будут проводиться в дальнейшем, будут осуществляться численно, поэтому вопрос о количестве параметров не является принципиальным.

Уравнения движения рассматриваемой системы имеют вид классических уравнений Кирхгофа [26]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}} \right) + \mathbf{\Omega} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}} = 0, \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \mathbf{\Omega}} \right) + \mathbf{\Omega} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{\Omega}} + \mathbf{V} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}} = 0;$$

с учетом (1.1) могут быть записаны в виде

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{\Omega}} = (\mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\mathbf{\Omega}) \times \mathbf{\Omega},$$

$$\mathbf{B}^T \dot{\mathbf{V}} + \mathbf{I}\dot{\mathbf{\Omega}} + \mathbf{K}(t) = (\mathbf{B}^T \mathbf{V} + \mathbf{I}\mathbf{\Omega} + \mathbf{K}(t)) \times \mathbf{\Omega} + (\mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\mathbf{\Omega}) \times \mathbf{V} = 0. \quad (1.2)$$

Данные уравнения необходимо дополнить уравнениями эволюции переменных  $(\mathbf{r}, \mathbf{Q})$ , которые описываются уравнениями Пуассона и кинематическими соотношениями следующего вида:

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}} = \boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{\Omega}, \quad \dot{\boldsymbol{\beta}} = \boldsymbol{\beta} \times \mathbf{\Omega}, \quad \dot{\boldsymbol{\gamma}} = \boldsymbol{\gamma} \times \mathbf{\Omega}, \quad (1.3)$$

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{Q}^T \mathbf{V}. \quad (1.4)$$

Уравнения (1.2), (1.3), (1.4) полностью описывают движение рассматриваемой системы. Однако удобней записать данные уравнения в гамильтоновой форме [27]:

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{P} \times \mathbf{\Omega}, \quad \dot{\mathbf{M}} = \mathbf{M} \times \mathbf{\Omega} + \mathbf{P} \times \mathbf{V}, \quad (1.5)$$

где  $\mathbf{P} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}}$  и  $\mathbf{M} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{\Omega}}$  имеют гидродинамический смысл и называются соответственно импульсивным моментом и импульсивной силой. При этом  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{\Omega}$  связаны с этими векторами следующим образом:

$$\mathbf{P} = \mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\mathbf{\Omega}, \quad \mathbf{M} = \mathbf{B}^T \mathbf{V} + \mathbf{I}\mathbf{\Omega} + \mathbf{K}(t),$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{P} - \mathbf{B}\mathbf{\Omega}), \quad \mathbf{\Omega} = (\mathbf{I} - \mathbf{B}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B})^{-1}(\mathbf{M} - \mathbf{K}(t) - \mathbf{B}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{P}).$$

Уравнения (1.5) являются гамильтоновыми на алгебре  $e(3)$  с гамильтонианом

$$H = (\mathbf{M}, \mathbf{\Omega}) - T|_{\mathbf{\Omega}, \mathbf{V} \rightarrow \mathbf{M}, \mathbf{P}}.$$

Уравнения (1.3) допускают шесть геометрических интегралов движения:

$$\alpha^2 = \beta^2 = \gamma^2 = 1, \quad (\alpha, \beta) = (\alpha, \gamma) = (\beta, \gamma) = 0.$$

Как указано в [28], уравнения (1.5) допускают еще шесть интегралов:

$$(\mathbf{P}, \alpha), \quad (\mathbf{P}, \beta), \quad (\mathbf{P}, \gamma), \quad (\mathbf{M} + \mathbf{r} \times \mathbf{P}, \alpha), \quad (\mathbf{M} + \mathbf{r} \times \mathbf{P}, \beta), \quad (\mathbf{M} + \mathbf{r} \times \mathbf{P}, \gamma). \quad (1.6)$$

Данные интегралы движения имеют следующий смысл: при движении тела в идеальной жидкости векторы  $\mathbf{P}$  и  $\mathbf{M} + \mathbf{r} \times \mathbf{P}$  сохраняются в абсолютном пространстве. В случае движения из состояния покоя первые интегралы (1.6) приобретают особенно простой вид:

$$\mathbf{P} = 0, \quad \mathbf{M} = 0, \quad (1.7)$$

а выражения для скоростей следующие:

$$\mathbf{V} = -\mathbf{C}^{-1}\mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}, \quad \boldsymbol{\Omega} = -(\mathbf{I} - \mathbf{V}^T\mathbf{C}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{K}(t).$$

Решения системы уравнений (1.2) и (1.3) относительно  $\mathbf{K}(t)$  позволяют находить управляющие воздействия  $\omega_k(t)$  для движения вдоль заданной траектории, которая описывается уравнением (1.4).

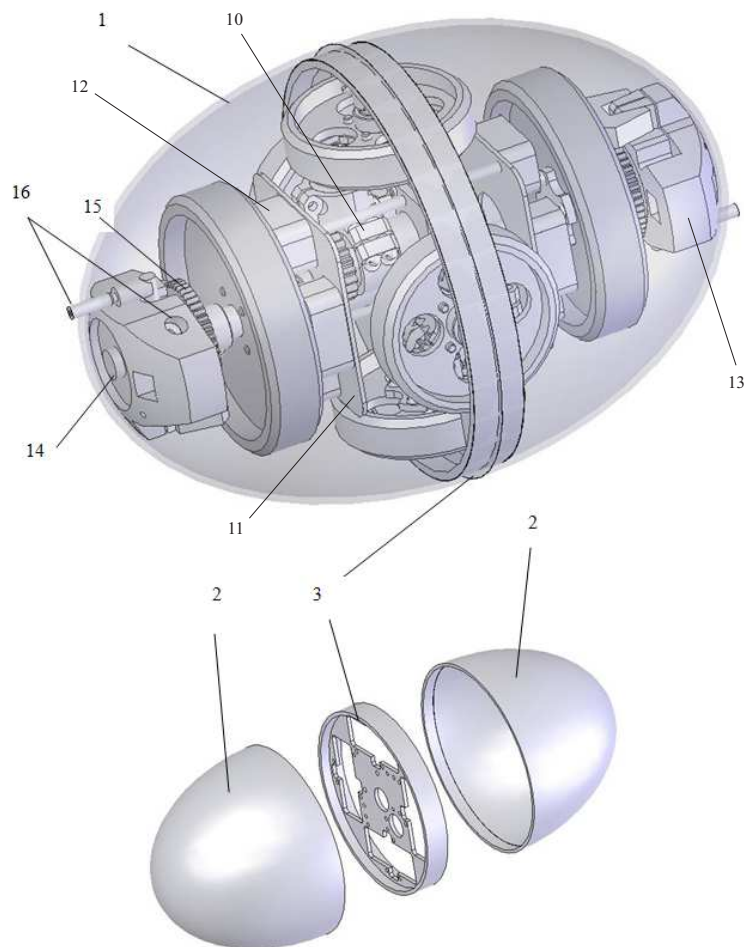
Далее рассмотрим особенности технической реализации конструкции безвинтового подводного робота.

## § 2. Описание конструкции безвинтового подводного робота

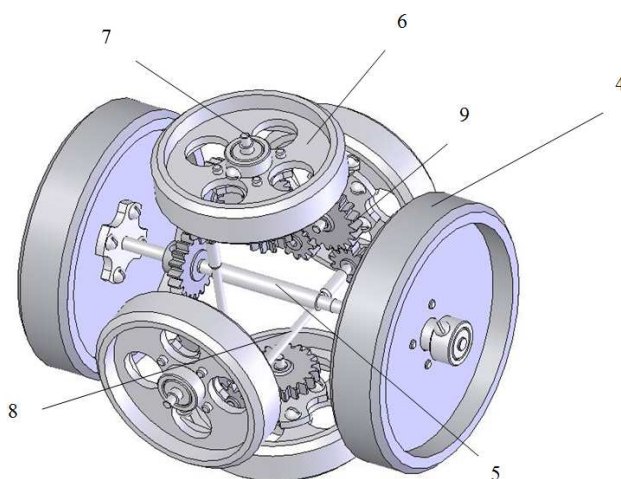
В лаборатории нелинейного анализа и конструирования новых средств передвижения ФГБОУ ВПО «УдГУ» разработана конструкция безвинтового подводного робота, трехмерная модель которого приведена на рисунке 2.

Основой конструкции безвинтового подводного робота является оболочка (1) в форме эллипсоида, составленная из двух одинаковых половин (2), присоединенных друг к другу по экваториальной плоскости с помощью дискообразной перегородки — платформы (3). Размер эллипсоида по большей оси составляет 300 мм, по меньшей — 200 мм. Толщина оболочки (3 мм) и применяемый материал обеспечивают необходимую прочность при погружении и перемещении робота. Соединение полуболонок и платформы обеспечивает герметичность внутренней полости. Внутри корпуса робота установлены три пары роторов (далее — система роторов) таким образом, что оси роторов расположены под углом  $90^\circ$  по отношению друг к другу. Ось одной из пар роторов направлена вдоль оси вращения эллипсоида, а две другие пары расположены в экваториальной плоскости. Обеспечение точного управляющего воздействия  $\omega_k(t)$  осуществляется с помощью встроенных в приводы датчиков обратной связи (энкодеров). Система роторов (см. рис. 3) подводного робота включает пару роторов большего размера (4), установленных симметрично относительно платформы (3) на одной общей оси (5), и двух других пар роторов меньшего размера (6), расположенных (по направлениям осей) перпендикулярно первой паре и перпендикулярно друг другу в экваториальной плоскости. Оси (7) малых роторов выполнены отдельно для каждого маховика и установлены соосно на некотором расстоянии друг от друга. Малые роторы соединены кинематически попарно с помощью промежуточных (дополнительных) осей (8) и зубчатых пар (9) таким образом, что их вращение происходит так же, как если бы они были на одной общей оси.

Для приведения в движение системы роторов каждая из пар роторов оснащена высокомоментными мотор-редукторами (10), которые установлены в соответствующих опорах на платформе. В пространствах между большими и малыми роторами симметрично с двух сторон относительно платформы на панелях (11) смонтированы модули (12) питания, управления и связи. Передача данных для управления движением и получения дополнительной информации о состоянии системы реализована на беспроводном варианте связи, достаточном для проведения экспериментов в бассейне.



**Рис. 2.** Конструкция и корпусные элементы экспериментальной модели безвинтового подводного робота



**Рис. 3.** Конструктивное исполнение системы роторов

Размещение узлов на платформе выполнено таким образом, чтобы в максимальной степени обеспечить симметричное расположение масс относительно геометрического центра тела, а также по возможности обеспечить минимальное отклонение центра масс от геометрического.

Для погружения робот оснащен механизмом регулировки плавучести. Он состоит из двух одинаковых модулей плавучести (13), размещенных и закрепленных внутри полуболочек в наиболее удаленных частях относительно платформы. Модули плавучести (рис. 2) имеют в своем составе лопастной насос (14) с приводом (15) на основе микроэлектродвигателя с редуктором. Полости насоса (воздушная и жидкостная) имеют каналы (16), соединяющие их соответственно с внутренней полостью и внешней средой.

В качестве управляющих воздействий будем использовать скорости вращения роторов  $\omega_k(t)$ , так как можем обеспечить их контроль с помощью энкодеров.

Разработанная конструкция безвинтового подводного робота имеет следующие характеристики: масса оболочки  $m_s = 2.923$  кг, момент инерции маховиков большего размера  $i_1 = 7.491 \cdot 10^{-4}$  кг·м, их масса  $m_1 = 0,303$  кг, момент инерции маховиков меньшего размера  $i_2 = i_3 = 0.491 \cdot 10^{-4}$  кг·м, их масса  $m_2 = m_3 = 0,037$  кг.

Кроме данных параметров важным является определение реального тензора инерции и матрицы коэффициентов присоединенных масс. Экспериментальные методики определения данных параметров известны, но являются сложными и трудоемкими [29].

Изучение и анализ характеристик движения подводного безвинтового робота предполагается проводить путем наблюдения и видеозаписи перемещений с помощью системы для исследования потоков жидкостей и газов PIV (Particle Image Velocimetry) с целью дальнейшей компьютерной обработки информации.

Авторы выражают благодарность Килину А.А. за ценные советы и плодотворные обсуждения полученных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития // Электроника: наука, технология, бизнес. 2009. № 8. С. 88–93.
2. 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.
3. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Касаткин Б.А. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. 224 с.
4. Бочаров А.Ю. Современные тенденции в развитии миниатюрных подводных аппаратов и роботов за рубежом // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 36–52.
5. Агеев М.Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М.: Наука, 2005. 400 с.
6. Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots: A survey // Autonomous Robots. 2000. Vol. 8. № 1. P. 7–24.
7. Lipski R., Putz C., Sikkema N. Autonomous underwater robots // Bradley University. [http://cegt201.bradley.edu/projects/proj2015/autonomous\\_underwater\\_robots/Deliverables/Project\\_Proposal.pdf](http://cegt201.bradley.edu/projects/proj2015/autonomous_underwater_robots/Deliverables/Project_Proposal.pdf) (дата обращения: 1.10.2015).
8. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука, 2005. 272 с.
9. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко В.В., Ваулин Ю.В. Навигация и управление в подводном пространстве // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 11. С. 35.
10. Kato N., Ito Y., Kojima J., Takagi S., Asakawa K., Shirasaki Y. Control performance of autonomous underwater vehicle «AQUA EXPLORER 1000» for inspection of underwater cables // Proceedings of IEEE Conference «Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation» (OCEANS' 94). 1994. Vol. 1. P. I/135–I/140.
11. Meldrum D.T., Haddrell T. GPS in autonomous underwater vehicles // Proceedings of the Sixth International Conference on Electronic Engineering in Oceanography. 19–21 July 1994. Cambridge, UK. Institution of Electrical Engineers, London. Publication № 394. P. 11–17.
12. Lapierre L., Soetanto D. Nonlinear path-following control of an AUV // Ocean Engineering. 2007. Vol. 34. № 11. P. 1734–1744.
13. Loebis D., Sutton R., Chudley J., Naeem W. Adaptive tuning of a Kalman filter via fuzzy logic for an intelligent AUV navigation system // Control Engineering Practice. 2004. Vol. 12. № 12. P. 1531–1539.
14. Ishii K., Fujii T., Ura T. An on-line adaptation method in a neural network based control system for AUVs // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1995. Vol. 20. № 3. P. 221–228.

15. Woolsey C.A., Leonard N.E. Stabilizing underwater vehicle motion using internal rotors // *Automatica*. 2002. Vol. 38. № 12. P. 2053–2062.
16. Борейко А.А., Горнак В.Е., Мальцева С.В., Матвиенко Ю.В., Михайлов Д.Н. Малогабаритный многофункциональный автономный необитаемый подводный аппарат «МТ-2010» // *Подводные исследования и робототехника*. 2011. № 2 (12). С. 37–42.
17. Лушников Б.В., Яцун С.Ф., Политов Е.Н., Тарасова Е.С. Компьютерное моделирование динамики бионического плавающего робота // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010. Т. 12. № 4 (3). С. 562–567.
18. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н. Мобильные роботы, управляемые движением внутренних тел // *Труды Института математики и механики УрО РАН*. 2010. Т. 16. № 5. С. 213–222.
19. Borisov A.V., Kilin A.A., Mamaev I.S. How to control Chaplygin's sphere using rotors // *Regular and Chaotic Dynamics*. 2012. Vol. 17. № 3-4. P. 258–272.
20. Borisov A.V., Kilin A.A., Mamaev I.S. How to control the Chaplygin all using rotors. II // *Regular and Chaotic Dynamics*. 2013. Vol. 18. № 1-2. P. 144–158.
21. Волкова Л.Ю., Яцун С.Ф. Управление движением трехмассового робота, перемещающегося в жидкой среде // *Нелинейная динамика*. 2011. Т. 7. № 4. С. 845–857.
22. Патент на полезную модель № 153711 РФ, МПК В 62 D 57/04. Безвинтовой надводный робот / Борисов А.В., Мамаев И.С., Килин А.А., Калинин А.А., Караваев Ю.Л., Кленов А.И., Ветчанин Е.В., Тененев В.А.; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»; Заявка: 2014140140/11, 03.10.2014, опубл. 27.07.2015.
23. Рамоданов С.М., Тененев В.А. Движение тела с переменной геометрией масс в безграничной вязкой жидкости // *Нелинейная динамика*. 2011. Т. 7. № 3. С. 635–647.
24. Ветчанин Е.В., Тененев В.А. Моделирование управления движением в вязкой жидкости тела с переменной геометрией масс // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2011. Т. 3. № 4. С. 371–381.
25. Ветчанин Е.В., Мамаев И.С., Тененев В.А. Движение тела с переменной геометрией масс в вязкой жидкости // *Нелинейная динамика*. 2012. Т. 8. № 4. С. 815–836.
26. Борисов А.В., Мамаев И.С. Динамика твердого тела. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 576 с.
27. Clebsch A. Über die Bewegung eines Körpers in einer Flüssigkeit // *Math. Annalen*. 1870. Vol. 3. P. 238–262.
28. Козлов В.В., Рамоданов С.М. О движении изменяемого тела в идеальной жидкости // *ПММ*. 2001. № 4. С. 592–601.
29. Алалыкин С.С., Богатырев А.В., Иванова Т.Б., Пивоварова Е.Н. Определение моментов инерции и положения центра масс робототехнических устройств // *Вестник Удмуртского университета. Физика и химия*. 2014. № 4. С. 79–86

Поступила в редакцию 04.11.2015

Ветчанин Евгений Владимирович, к. ф.-м. н., доцент, Удмуртский государственный университет, 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1; Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7.  
E-mail: eugene186@mail.ru

Караваев Юрий Леонидович, к. ф.-м. н., старший преподаватель, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7; Удмуртский государственный университет, 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1  
E-mail: karavaev\_yury@istu.ru

Калинкин Анатолий Александрович, к. т. н., доцент, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7.  
E-mail: kge@idz.ru

Клековкин Антон Владимирович, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7.  
E-mail: klanvlad@mail.ru



Пивоварова Елена Николаевна, аспирант, Удмуртский государственный университет, 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1; Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7.  
E-mail: l.n.pivovarova@gmail.com

***E. V. Vetchanin, Yu. L. Karavaev, A. A. Kalinkin, A. V. Klekovkin, E. N. Pivovarova***  
**Model of screwless underwater robot**

*Keywords:* mobile robot, screwless underwater robot, movement in ideal fluid.

MSC: 70Hxx, 70G65

The paper is devoted to the development of a model of an underwater robot actuated by inner rotors. This design has no moving elements interacting with an environment, which minimizes a negative impact on it, and increases noiselessness of the robot motion in a liquid. Despite numerous discussions on the possibility and efficiency of motion by means of internal masses' movement, a large number of works published in recent years confirms a relevance of the research. The paper presents an overview of works aimed at studying the motion by moving internal masses. A design of a screwless underwater robot that moves by the rotation of inner rotors to conduct theoretical and experimental investigations is proposed. In the context of theoretical research a robot model is considered as a hollow ellipsoid with three rotors located inside so that the axes of their rotation are mutually orthogonal. For the proposed model of a screwless underwater robot equations of motion in the form of classical Kirchhoff equations are obtained.

#### REFERENCES

1. Bocharov L. Unmanned underwater vehicles. Their status and general development trends, *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2009, no. 8, pp. 88–93 (in Russian).
2. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Comparative analysis and the optimization of the autonomous underwater robots dynamic properties of different projects and configurations, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2012, no. 1 (13), pp. 24–35 (in Russian).
3. Ageev M.D., Kiselev L.V., Kasatkin B.A. *Avtomaticheskie podvodnye apparaty* (Automatic underwater vehicles), Leningrad: Sudostroenie, 1981, 224 p.
4. Bocharov A.Yu. Modern trends in the development of tiny underwater vehicles and robots abroad, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2006, no. 2, pp. 36–52 (in Russian).
5. Ageev M.D. *Autonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii* (Autonomous underwater robots. Systems and technologies), Moscow: Nauka, 2005, 400 p.
6. Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots: A survey, *Autonomous Robots*, 2000, vol. 8, no. 1, pp. 7–24.
7. Lipski R., Putz C., Sikkema N. *Autonomous underwater robots* [electronic resource], Bradley University. [http://cegt201.bradley.edu/projects/proj2015/autonomous\\_underwater\\_robots/Deliverables/Project\\_Proposal.pdf](http://cegt201.bradley.edu/projects/proj2015/autonomous_underwater_robots/Deliverables/Project_Proposal.pdf) (accessed: 1.10.2015).
8. Filaretov V.F., Lebedev A.V., Yukhimets D.A. *Ustroistva i sistemy upravleniya podvodnykh robotov* (Equipments and control systems of underwater robots), Moscow: Nauka, 2005, 272 p.
9. Kiselev L.V., Inzartsev A.V., Matvienko V.V., Vaulin Yu.V. Navigation and control in hydrospace, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2004, no. 11, p. 35 (in Russian).
10. Kato N., Ito Y., Kojima J., Takagi S., Asakawa K., Shirasaki Y. Control performance of autonomous underwater vehicle "AQUA EXPLORER 100" for inspection of underwater cables, *Proceedings of IEEE Conference "Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation" (OCEANS'94)*, 1994, vol. 1, pp. I/135–I/140.
11. Meldrum D.T., Haddrell T. GPS in autonomous underwater vehicles, *Proceedings of the Sixth International Conference on Electronic Engineering in Oceanography*, 19–21 July 1994, Cambridge, UK, Institution of Electrical Engineers, London, Publication no. 394, pp. 11–17.
12. Lapiere L., Soetanto D. Nonlinear path-following control of an AUV, *Ocean Engineering*, 2007, vol. 34, no. 11, pp. 1734–1744.
13. Loebis D., Sutton R., Chudley J., Naeem W. Adaptive tuning of a Kalman filter via fuzzy logic for an intelligent AUV navigation system, *Control Engineering Practice*, 2004, vol. 12, no. 12, pp. 1531–1539.
14. Ishii K., Fujii T., Ura T. An on-line adaptation method in a neural network based control system for AUVs, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1995, vol. 20, no. 3, pp. 221–228.

15. Woolsey C.A., Leonard N.E. Stabilizing underwater vehicle motion using internal rotors, *Automatica*, 2002, vol. 38, no. 12, pp. 2053–2062.
16. Boreiko A.A., Gornak V.E., Mal'tseva S.V., Matvienko Yu.V., Mikhailov D.N. Small multifunctional autonomous underwater vehicle "MT-2010", *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2011, no. 2 (12), pp. 37–42 (in Russian).
17. Lushnikov B.V., Yatsun S.F., Politov E.N., Tarasova E.S. Computer simulation of bionic floating robot dynamics, *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Ross. Akad. Nauk*, 2010, vol. 12, no. 4 (3), pp. 562–567 (in Russian).
18. Chernous'ko F.L., Bolotnik N.N. Mobile robots controlled by the motion of internal bodies, *Tr. Inst. Mat. Mekh. Ural. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2010, vol. 16, no. 5, pp. 213–222 (in Russian).
19. Borisov A.V., Kilin A.A., Mamaev I.S. How to control Chaplygin's sphere using rotors, *Regular and Chaotic Dynamics*, 2012, vol. 17, no. 3-4, pp. 258–272.
20. Borisov A.V., Kilin A.A., Mamaev I.S. How to control the Chaplygin ball using rotors. II, *Regular and Chaotic Dynamics*, 2013, vol. 18, no. 1-2, pp. 144–158.
21. Volkova L.Yu., Yatsun S.F. Control of the three-mass robot moving in the liquid environment, *Nelin. Dinam.*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 845–857 (in Russian).
22. Borisov A.V., Mamaev I.S., Kilin A.A., Kalinkin A.A., Karavaev Yu. L., Klenov A.I., Vetchanin E.V., Tenenev V.A. *Bezvintovoi nadvodnyi robot* (Screwless above-water robot). Patent RF, no. 153711, 2015.
23. Ramodanov S.M., Tenenev V.A. Motion of a body with variable distribution of mass in a boundless viscous liquid, *Nelin. Dinam.*, 2011, vol. 7, no. 3, pp. 635–647 (in Russian).
24. Vetchanin E.V., Tenenev V.A. Motion control simulating in a viscous liquid of a body with variable geometry of weights, *Komp'yuternye Issledovaniya i Modelirovanie*, 2011, vol. 3, no. 4, pp. 371–381 (in Russian).
25. Vetchanin E.V., Mamaev I.S., Tenenev V.A. The motion of a body with variable mass geometry in a viscous fluid, *Nelin. Dinam.*, 2012, vol. 8, no. 4, pp. 815–836 (in Russian).
26. Borisov A.V., Mamaev I.S. *Dinamika tverdogo tela* (Rigid body dynamics), Moscow–Izhevsk: Institute of Computer Science, 2005, 576 p.
27. Clebsch A. Über die Bewegung eines Körpers in einer Flüssigkeit, *Math. Annalen*, 1871, vol. 3, pp. 238–262.
28. Kozlov V.V., Ramodanov S.M. Motion of a variable body in an ideal liquid, *J. Appl. Math. Mech.*, 2001, vol. 65, no. 4, pp. 579–587.
29. Alalykin S.S., Bogatyrev A.V., Ivanova T.B., Pivovarova E.N. Determination of moments of inertia and the position of the center of mass of robotic devices, *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Fizika i Khimiya*, 2014, vol. 4, pp. 79–86 (in Russian).

Received 04.11.2015

Vetchanin Evgenii Vladimirovich, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Udmurt State University, ul. Universitetskaya, 1, Izhevsk, 426034, Russia; Izhevsk State Technical University, ul. Studencheskaya, 7, Izhevsk, 426069, Russia.

E-mail: eugene186@mail.ru

Karavaev Yurii Leonidovich, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Lecturer, Izhevsk State Technical University, ul. Studencheskaya, 7, Izhevsk, 426069, Russia; Udmurt State University, ul. Universitetskaya, 1, Izhevsk, 426034, Russia.

E-mail: karavaev\_yury@istu.ru

Kalinkin Anatolii Aleksandrovich, Candidate of Engineering, Associate Professor, Izhevsk State Technical University, ul. Studencheskaya, 7, Izhevsk, 426069, Russia.

E-mail: kge@idz.ru

Klekovkin Anton Vladimirovich, post-graduate student, Izhevsk State Technical University, ul. Studencheskaya, 7, Izhevsk, 426069, Russia.

E-mail: klanvlad@mail.ru

Pivovarova Elena Nikolaevna, post-graduate student, Udmurt State University, ul. Universitetskaya, 1, Izhevsk, 426034, Russia; Izhevsk State Technical University, ul. Studencheskaya, 7, Izhevsk, 426069, Russia.

E-mail: l.n.pivovarova@gmail.com