

УДК 629.12

DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.009

Анализ параметров пространственного движения подводного глайдера дискообразной формы

Сухоруков Андрей Львович, Титов Максим Александрович

Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин»,

Россия, Санкт-Петербург, *su_andr@yahoo.com*

Аннотация. В работе построена математическая модель и определены параметры пространственного движения дискообразного глайдера модифицированной формы при маневрировании по глубине и курсу. Модификация заключалась в создании на корпусе глайдера профилированной кольцеобразной «проточки». Введение данного конструктивного элемента уменьшает значение опрокидывающего момента и увеличивает демпфирующий момент, что, в свою очередь, улучшает параметры устойчивости глайдера в вертикальной плоскости. Маневрирование осуществлялось за счет работы механизма изменения плавучести и механизма тонкой дифферентовки глайдера. Показано, что введение в конструкцию механизма тонкой дифферентовки позволяет оптимизировать угол атаки глайдера. Определены схемы работы механизмов изменения плавучести и тонкой дифферентовки, обеспечивающие устойчивое маневрирование глайдера дискообразной формы по глубине и курсу.

Ключевые слова: подводный планер, глайдер, пространственное маневрирование, дискообразная форма, избыточная плавучесть, устойчивость движения, гидродинамическое качество, угол атаки

Цитирование: Сухоруков А.Л. Анализ параметров пространственного движения подводного глайдера дискообразной формы / А.Л. Сухоруков, М.А. Титов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 119-135. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.009.

Введение. Сегодня возрос интерес к проектированию автономных необитаемых подводных аппаратов с нетрадиционными принципами движения. Среди таких аппаратов выделяются подводные планеры (глайдеры). Важным достоинством этого типа аппаратов по сравнению с другими типами является существенная экономия энергии, затрачиваемой на движение, а также пониженное значение шумности. Движение подводных планеров осуществляется за счет многократного создания знакопеременной избыточной плавучести. Особое место среди таких аппаратов занимают глайдеры дискообразной формы, предложенные японскими специалистами [1]. Выбор данной формы аппарата определяется его «всенаправленностью», то есть способностью выполнять управляемое движение при погружении и всплытии в любом направлении.

При дискообразной форме корпуса встает вопрос об обеспечении устойчивости движения подводного аппарата в вертикальной плоскости вследствие большого значения позиционного опрокидывающего момента. В работе на основе численных методов динамики вязкой жидкости [2-4] проведен сопоставительный анализ гидродинамических характеристик глайдера с исходной дискообразной формой корпуса [1] и глайдера с модифицированной формой корпуса, предложенной авторами настоящей статьи. Определение коэффициентов позиционных и вращательных гидродинамических сил и моментов подводного аппарата осуществлялось на основе численного решения уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу [5-10]. Модификация заключалась в создании профилированной кольцеобразной «проточки» вблизи внешнего периметра аппарата симметрично на верхней и нижней частях корпуса. При этом радиус кривизны «проточки» выбирался близким к радиусу кривизны внешнего обвода дискообразного глайдера. Как показали результаты расчетов гидродинамических характеристик и последующее математическое моделирование параметров движения аппарата в вертикальной плоскости, создание «проточки» на корпусе подводного аппарата приводит к уменьшению опрокидывающего момента, увеличению коэффициента подъемной силы и улучшению параметров устойчивости глайдера при движении в вертикальной плоскости.

Построена математическая модель и определены параметры пространственного движения дискообразного глайдера модифицированной формы при маневрировании по глубине и курсу. Маневрирование осуществлялось за счет работы механизма изменения плавучести и механизма тонкой дифферентовки глайдера. Показана принципиальная возможность осуществления пространственных маневров глайдером дискообразной формы за счет работы указанных выше механизмов.

1. Конструктивные параметры подводного глайдера модифицированной формы.

Подводный глайдер дискообразной формы, предложенный японскими специалистами, имеет диаметр корпуса 1,9 м, что позволило достаточно легко проводить операции по его сборке и техническому обслуживанию (рис.1). Высота корпуса аппарата 0,55 м, полное подводное водоизмещение аппарата составляет $0,535 \text{ м}^3$. Предполагается, что глайдер в исходном состоянии обладает нулевой плавучестью. Центр тяжести расположен на вертикальной оси симметрии аппарата, возвышение точки приложения архимедовой силы над центром тяжести (метацентрическая высота) составляет $h=0,24 \text{ м}$. Момент инерции аппарата относительно горизонтальных осей симметрии составляет $J_{ox1} = J_{oz1} = 76,64 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, а относительно вертикальной оси симметрии $J_{oy1} = 143,08 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

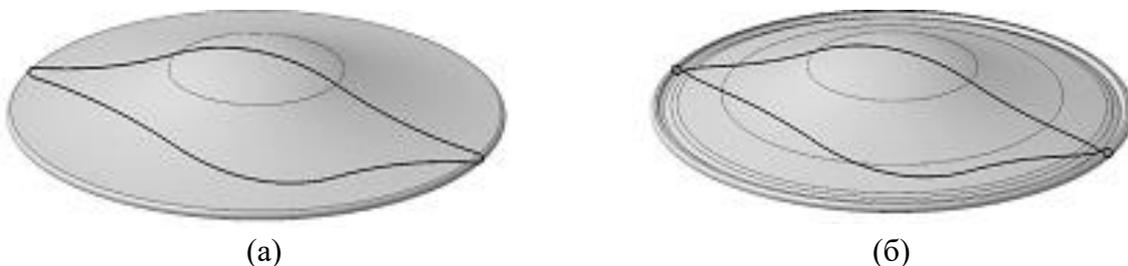


Рис. 1. Подводный глайдер исходной (а) и модифицированной (б) формы

Предложенная исходная форма аппарата [1] приводит к значительному опрокидывающему моменту при заданном угле атаки. Для уменьшения этого момента предложена модификация формы корпуса аппарата с созданием профилированной кольцеобразной «проточки» вблизи внешнего периметра аппарата симметрично на верхней и нижней частях корпуса. Такая профилировка приводит к значительному повышению статического давления потока в нижней кормовой части аппарата при положительных углах атаки за счет того, что в этом случае поток натекает на боковую стенку «проточки» (рис. 2). Кроме того, при положительных углах атаки с наличием «проточки» наблюдается уменьшение длины зоны разрежения в верхней носовой части глайдера (рис.3). Это, в свою очередь, приводит к уменьшению опрокидывающего момента, что улучшает параметры устойчивости подводного аппарата.

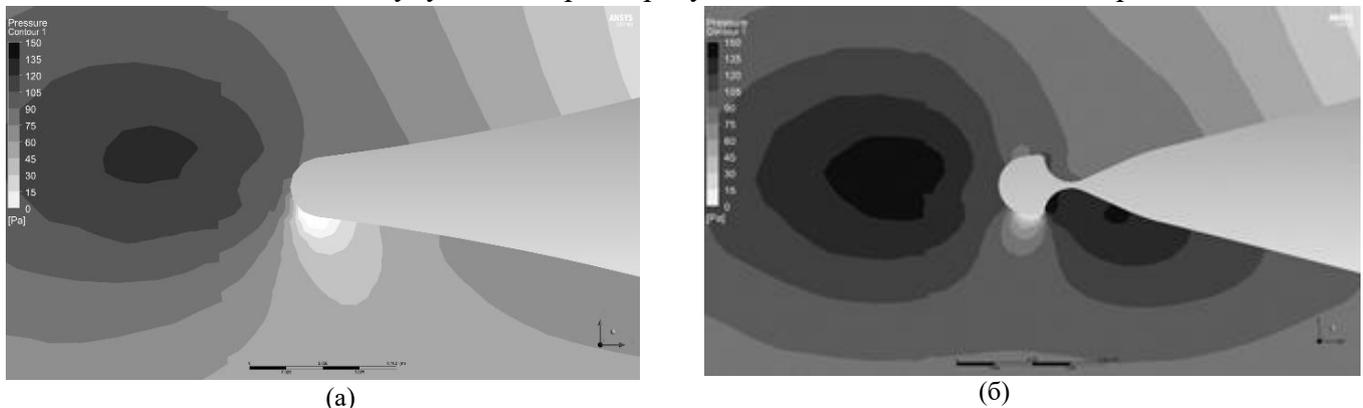


Рис. 2. Распределение статического давления потока в районе кормовой части глайдера при угле атаки 15 градусов: (а) – исходная форма; (б) – модифицированная форма

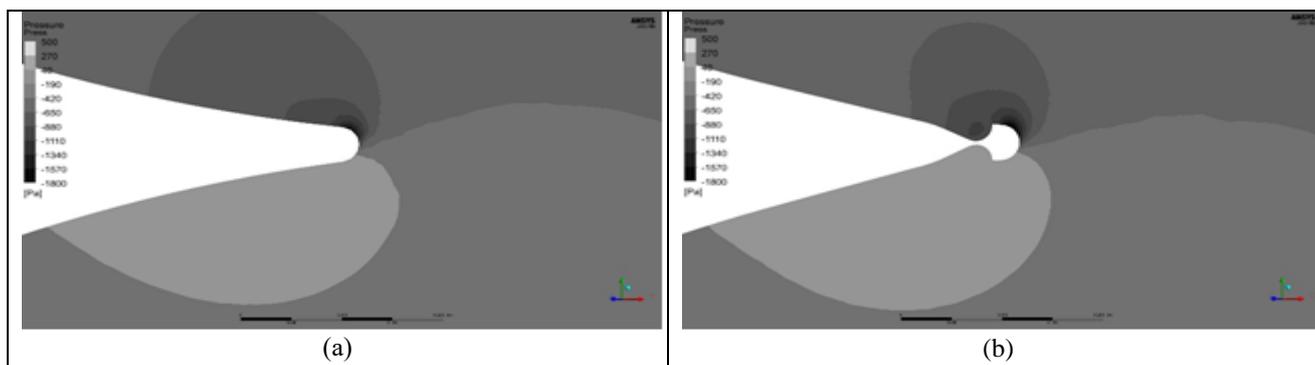


Рис. 3. Распределение статического давления потока в районе носовой части глайдера при угле атаки 15 градусов: (а) – исходная форма; (б) – модифицированная форма

Для управления маневрированием в корпусе глайдера установлен механизм изменения плавучести, состоящий из четырех гидроцилиндров 1-4 с поршнями и приводами. Схема механизма изменения плавучести и характерные размеры приведены на рисунке 4.

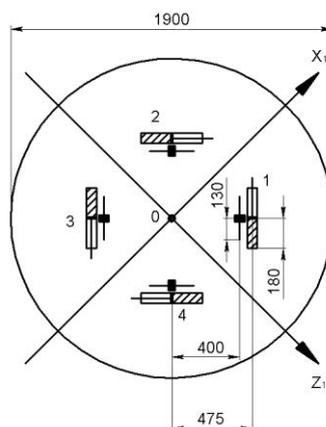


Рис. 4. Схема механизмов изменения плавучести и тонкой дифферентовки

Прием или удаление забортной воды из гидроцилиндров приводит к изменению плавучести глайдера относительно удифферентованного состояния. Также за счет работы механизма изменения плавучести возможно изменять точку приложения равнодействующей силы избыточной плавучести относительно вертикальной оси симметрии глайдера. Характеристики гидроцилиндров принимались в соответствии с данными работы [1]. Так удаляемый или принимаемый объем воды в каждом гидроцилиндре составляет $0,001 \text{ м}^3$, при этом ход поршня на удаление или прием равен 180 мм.

Кроме того, в корпусе глайдера установлен механизм тонкой дифферентовки состоящий из четырех дифферентовочных грузов массой 7,64 кг каждый, перемещающихся по направляющим стержням (рис. 4). Ход каждого дифферентовочного груза составляет 260 мм. Задействование данного механизма позволяет изменять угол дифферента и угол атаки глайдера без изменения избыточной плавучести.

Маневрирование глайдера по глубине осуществляется за счет смещения точки приложения равнодействующей силы избыточной плавучести относительно оси вертикальной оси OY_1 . При этом для маневрирования лишь в вертикальной плоскости точка приложения равнодействующей силы избыточной плавучести должна находиться в плоскости X_1OY_1 . Для маневрирования глайдера по курсу необходимо смещение точки приложения равнодействующей силы избыточной плавучести относительно плоскости X_1OY_1 . Далее при моделировании параметров движения глайдера будут рассмотрены различные режимы работы механизма изменения плавучести и механизма тонкой дифферентовки.

2. Численное определение гидродинамических характеристик глайдера модифицированной формы. Гидродинамические характеристики глайдера определялись с исполь-

зованием программного комплекса ANSYS/Fluent, вычислительные процедуры которого базируются на численном решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Для обеспечения требуемой точности расчета, связанной с корректным разрешением турбулентного пограничного слоя, задавалось сгущение узлов вычислительной сетки у поверхности глайдера. Расчет проводился на основе $k-\omega$ SST модели турбулентности. На входных границах расчетной области задавалась скорость набегающего потока, на выходных задавалось статическое давление в потоке на бесконечности, на поверхности объекта ставились условия прилипания и непротекания. Расчет проводился для разных углов атаки и дрейфа при скоростях набегающего потока 1 м/с и 2 м/с. Определялись гидродинамические силы и моменты, действующие на глайдер. Коэффициенты позиционных гидродинамических сил и моментов определялись на основе соотношений:

– в поточной системе координат:

$$F_x = c_x(\alpha) \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3}; \quad F_y = c_y(\alpha) \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3}; \quad M_z = m_z(\alpha) \frac{\rho_w v_0^2}{2} V, \quad (1)$$

где ρ_w – плотность набегающего потока; v_0 – скорость набегающего потока; V – водоизмещение аппарата;

– в связанной с глайдером системе координат:

$$F_{x1} = c_{x1}(\alpha) \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3}; \quad F_{y1} = c_{y1}(\alpha) \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3}; \quad M_{z1} = m_{z1}(\alpha) \frac{\rho_w v_0^2}{2} V;$$

$$F_{z1} = c_{z1}(\beta) \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3}, \quad (2)$$

где ρ_w – плотность набегающего потока; v_0 – скорость набегающего потока; V – водоизмещение глайдера; α – угол атаки; β – угол дрейфа.

Затем полученные зависимости коэффициентов позиционных гидродинамических сил и моментов аппроксимировались степенными полиномами от угла атаки α .

На рисунках ниже (рис.5-9) представлены графики зависимостей коэффициентов позиционных гидродинамических сил и моментов для глайдеров исходной и модифицированной формы.

Приведенные зависимости аппроксимировались полиномами следующего вида:

$$c_x(\alpha) = c_x^0 + c_x^{\alpha^2} \alpha^2 + c_x^{\alpha^4} \alpha^4; \quad (3)$$

$$c_y(\alpha) = c_y^\alpha \alpha + c_y^{\alpha|\alpha} |\alpha| |\alpha| + c_y^{\alpha^3} \alpha^3 + c_y^{\alpha^3|\alpha} \alpha^3 |\alpha| \quad (4)$$

Соответствующие значения коэффициентов полиномов для глайдера модифицированной формы в поточной системе координат приведены в таблице 1.

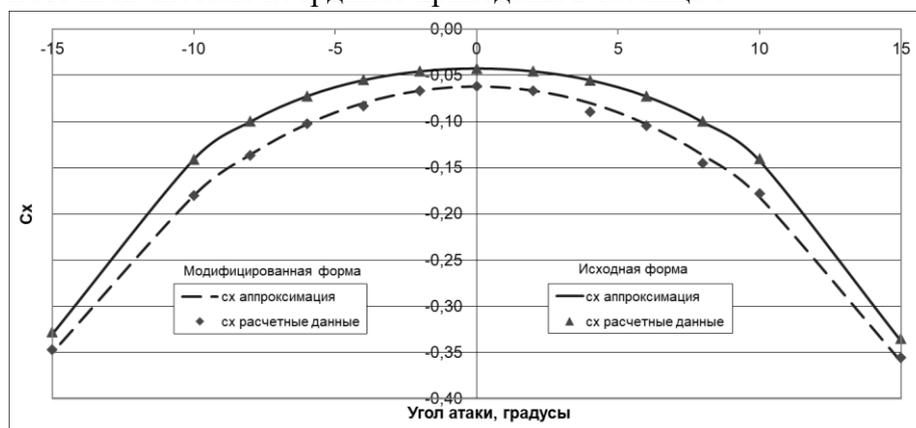


Рис. 5. График изменения коэффициента силы сопротивления $c_x(\alpha)$

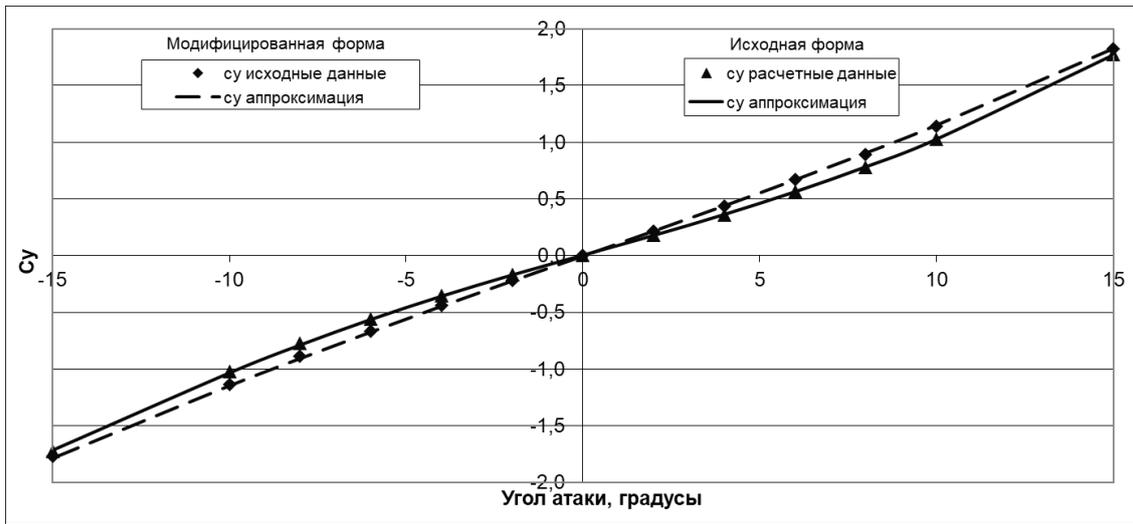


Рис. 6. График изменения коэффициента подъемной силы $c_y(\alpha)$

Таблица 1. Значения коэффициентов полиномов

№ п/п	Коэффициент	Значение
1		
1.1	C_x^0	-0,062
1.2	$C_x^{\alpha^2}$	-3,611
1.3	$C_x^{\alpha^4}$	-10,777
2		
2.1	C_y^α	6,271
2.2	$C_y^{\alpha \alpha }$	0,328
2.3	$C_y^{\alpha^3}$	9,405
2.4	$C_y^{\alpha^3 \alpha }$	-1,078

Далее приведены соответствующие графики зависимостей в связанной с глайдером системе координат.

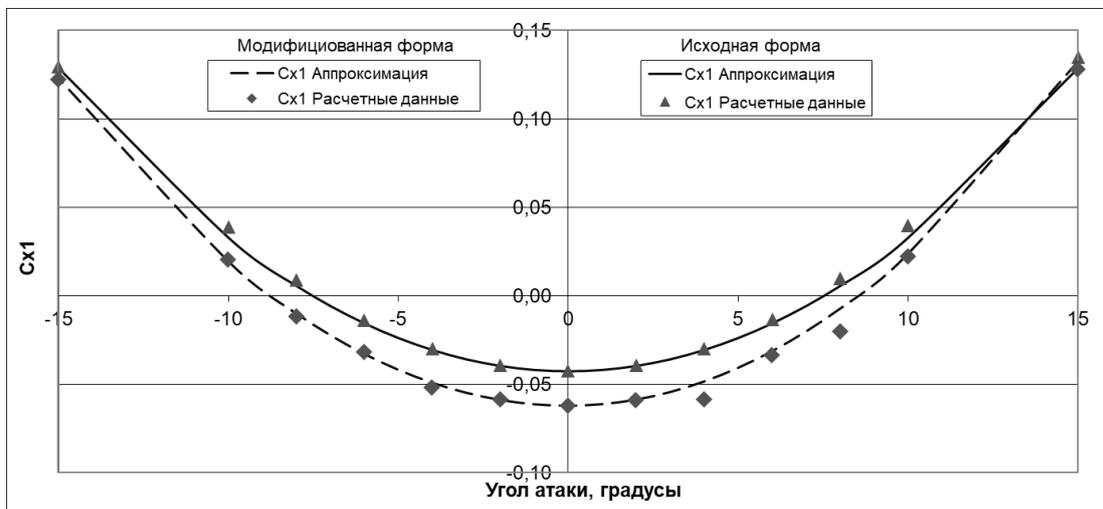


Рис. 7. График изменения коэффициента продольной силы $c_{x1}(\alpha)$

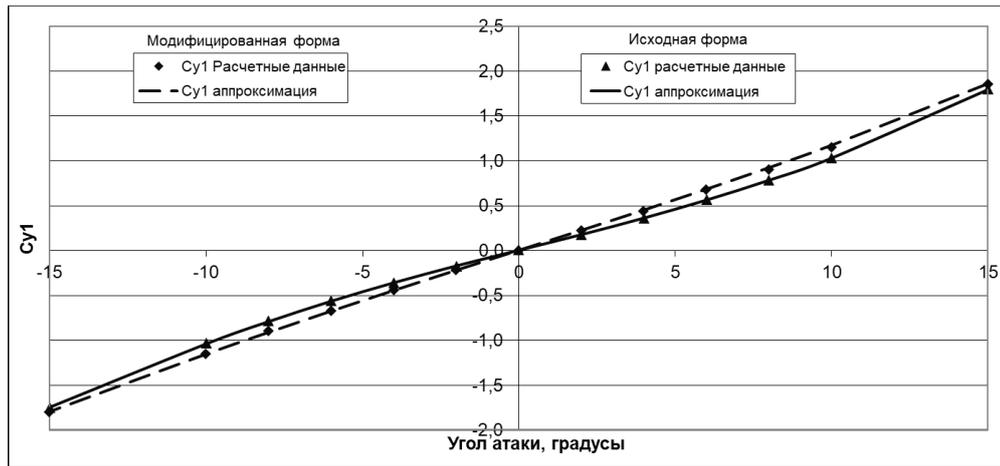


Рис. 8. График изменения коэффициента нормальной силы $c_{y1}(\alpha)$

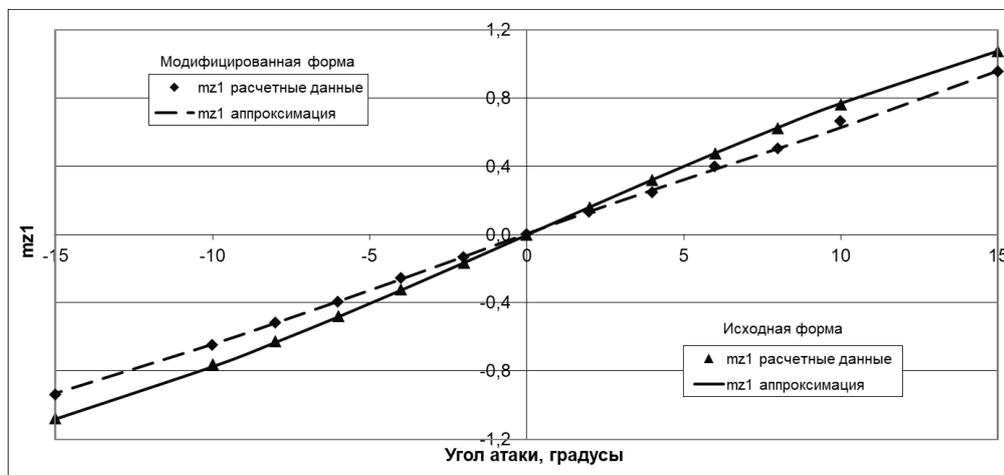


Рис. 9. График изменения коэффициента продольного момента $m_{z1}(\alpha)$

Приведенные выше зависимости аппроксимировались полиномами следующего вида:

$$c_{x_1}(\alpha) = c_{x_1}^0 + c_{x_1}^{\alpha^2} \alpha^2 + c_{x_1}^{\alpha^4} \alpha^4 \quad (5)$$

$$c_{y_1}(\alpha) = c_{y_1}^{\alpha} \alpha + c_{y_1}^{\alpha|\alpha|} \alpha |\alpha| + c_{y_1}^{\alpha^3} \alpha^3 + c_{y_1}^{\alpha^3|\alpha|} \alpha^3 |\alpha| \quad (6)$$

$$m_{z_1}(\alpha) = m_{z_1}^{\alpha} \alpha + m_{z_1}^{\alpha|\alpha|} \alpha |\alpha| + m_{z_1}^{\alpha^3} \alpha^3 \quad (7)$$

$$c_{z_1}(\beta) = c_{z_1}^{\beta} \beta \quad (8)$$

Соответствующие значения коэффициентов полиномов приведены в таблице 2:

Таблица 2. Значения коэффициентов полиномов

№ п/п	Коэффициент	Значение
1		
1.1	$C_{x_1}^0$	-0,062
1.2	$C_{x_1}^{\alpha^2}$	2,790
1.3	$C_{x_1}^{\alpha^4}$	0,539
2		

№ п/п	Коэффициент	Значение
2.1	$C_{y_1}^\alpha$	6,334
2.2	$C_{y_1}^{\alpha \alpha }$	0,657
2.3	$C_{y_1}^{\alpha^3}$	8,464
2.4	$C_{y_1}^{\alpha^3 \alpha }$	-0,11
3		
3.1	$C_{z_1}^\beta$	-0,050
4		
4.1	$m_{z_1}^\alpha$	3,852
4.2	$m_{z_1}^{\alpha \alpha }$	-3,283
4.3	$m_{z_1}^{\alpha^3}$	9,593

Кроме того, с использованием методики задания вращательных колебаний объекта в потоке жидкости [3] численно определялись демпфирующие вращательные характеристики глайдера с модифицированной формой корпуса: $c_{y_1}^{\omega_{x_1}} = -16,25$; $m_{x_1}^{\omega_{x_1}} = -0,55$; $m_{z_1}^{\omega_{z_1}} = -4,21$. Значение коэффициента $m_{y_1}^{\omega_{y_1}}$, определяющего демпфирующий момент со стороны вязких сил при вращении глайдера относительно вертикальной оси, рассчитывалось на основе аналитических соотношений для вращающегося в жидкости диска по методике [11] и составило $m_{y_1}^{\omega_{y_1}} = -0,075$

Коэффициенты присоединенных масс глайдера определялись на основе метода граничных интегральных уравнений для потенциала скорости. Расчетные значения коэффициентов присоединенных масс составили: $k_{11} = k_{33} = 0,168$; $k_{22} = 3,787$; $k_{44} = k_{66} = 3,276$. Наличие «проточки» слабо влияет на приведенные расчетные значения коэффициентов присоединенных масс. Отметим, что возможна приближенная аналитическая оценка этих коэффициентов по методике [12], в рамках которой корпус объекта схематизируется эллипсоидом. При этом было получено хорошее согласование значений коэффициентов присоединенных масс, полученных двумя методами.

3. Математическая модель пространственного движения глайдера. Уравнения пространственного движения подводного глайдера в проекциях на оси связанной системы $Ox_1Y_1Z_1$ (рис. 10) получены на основе соотношений, приведенных в [13, 14]:

$$\begin{aligned}
 m(1+k_{11})\frac{dv_{x_1}}{dt} &= c_{x_1}(\alpha)\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3} + m(1+k_{22})v_{y_1}\omega_{z_1} - m(1+k_{33})v_{z_1}\omega_{y_1} + p \sin \psi \quad ; \\
 m(1+k_{22})\frac{dv_{y_1}}{dt} &= c_{y_1}(\alpha)\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3} + c_{y_1}^{\omega_{z_1}}\frac{\rho_w v_0}{2}\omega_{z_1}V - \\
 &- m(1+k_{11})v_{x_1}\omega_{z_1} + m(1+k_{33})v_{z_1}\omega_{x_1} + p \cos \psi \cos \theta \quad ;
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 m(1+k_{33}) \frac{dv_{z1}}{dt} &= c_{z1}^\beta \frac{\rho_w v_0}{2} V^{2/3} v_{z1} - m(1+k_{22})v_{y1}\omega_{x1} + m(1+k_{11})v_{x1}\omega_{y1} - p \cos \psi \sin \theta ; \\
 J_{ox1}(1+k_{44}) \frac{d\omega_{x1}}{dt} &= m_{x1}^{\omega x1} \frac{\rho_w v_0}{2} \omega_{x1} V^{4/3} - [J_{oz1}(1+k_{66}) - J_{oy1}(1+k_{55})] \omega_{z1}\omega_{y1} - \\
 &- \rho_w Vgh \sin \theta \cos \psi - p(z_p \cos \theta + y_p \sin \theta) \cos \psi - \tilde{p}(z_n \cos \theta + y_n \sin \theta) \cos \psi ; \\
 J_{oy1}(1+k_{55}) \frac{d\omega_{y1}}{dt} &= m_{y1}^{\omega y1} \frac{\rho_w v_0}{2} \omega_{y1} V^{4/3} - [J_{ox1}(1+k_{44}) - J_{oz1}(1+k_{66})] \omega_{x1}\omega_{z1} + \\
 &+ p(x_p \cos \psi \sin \theta + z_p \sin \psi) + \tilde{p}(x_n \cos \psi \sin \theta + z_n \sin \psi) ; \\
 J_{oz1}(1+k_{66}) \frac{d\omega_{z1}}{dt} &= m_{z1}(\alpha) \frac{\rho_w v_0^2}{2} V + m_{z1}^{\omega z1} \frac{\rho_w v_0}{2} \omega_{z1} V^{4/3} - J_{oy1}(1+k_{55})\omega_{x1}\omega_{y1} + \\
 &+ J_{ox1}(1+k_{44})\omega_{x1}\omega_{y1} - \rho_w Vgh \sin \psi + p(x_p \cos \psi \cos \theta - y_p \sin \psi) + \\
 &+ \tilde{p}(x_n \cos \psi \cos \theta - y_n \sin \psi) ; \\
 \frac{d\psi}{dt} &= \frac{\omega_{z1}}{\cos \theta} ; \\
 \frac{d\theta}{dt} &= \omega_{x1} - tg\psi [\omega_{y1} - \omega_{z1}\theta] ; \\
 \frac{d\varphi}{dt} &= \frac{1}{\cos \psi} [\omega_{y1} - \omega_{z1}\theta] ; \\
 \alpha &= -arctg \frac{v_{y1}}{v_{x1}} ,
 \end{aligned}$$

где ρ_w – плотность воды; V – водоизмещение глайдера; v_{x1}, v_{y1}, v_{z1} – проекции вектора скорости глайдера на оси OX_1, OY_1, OZ_1 ; v_0 – абсолютная величина вектора скорости глайдера; m – масса глайдера; $\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}$ – угловые скорости вращения глайдера относительно осей OX_1, OY_1, OZ_1 ; $J_{ox1}, J_{oy1}, J_{oz1}$ – моменты инерции корпуса глайдера относительно осей OX_1, OY_1, OZ_1 ; $k_{11}, k_{22}, k_{44}, k_{66}$ – коэффициенты присоединенных масс глайдера; $c_{x1}, c_{y1}, c_{z1}^\beta, m_{z1}$ – коэффициенты позиционных гидродинамических сил и моментов; $c_{y1}^{\omega z1}, m_{x1}^{\omega x1}, m_{y1}^{\omega y1}, m_{z1}^{\omega z1}$ – коэффициенты вращательных гидродинамических сил и моментов; h – метacentрическая высота; p – избыточная плавучесть; x_p, y_p, z_p – плечи равнодействующей силы избыточной плавучести в связанной системе координат; \tilde{p} – суммарный вес дифферентовочных грузов; x_n, y_n, z_n – плечи дифферентовочного момента в связанной системе координат; ψ – угол дифферента; θ – угол крена; φ – курсовой угол; α – угол атаки глайдера.

Зная компоненты вектора скорости глайдера в связанной системе координат, с помощью матрицы направляющих косинусов [13] могут быть получены компоненты вектора скорости глайдера в неподвижной системе координат:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \psi & \sin \theta \sin \varphi - \cos \theta \cos \varphi \sin \psi & \cos \theta \sin \varphi + \sin \theta \cos \varphi \sin \psi \\ \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & -\sin \theta \cos \psi \\ -\cos \psi \sin \varphi & \sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \varphi \sin \psi & \cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \sin \theta \sin \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{z1} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Тогда могут быть определены параметры траектории глайдера:

$$x(t) = \int_0^t v_x(t) dt \quad ; \quad y(t) = \int_0^t v_y(t) dt \quad ; \quad z(t) = \int_0^t v_z(t) dt \quad . \quad (11)$$

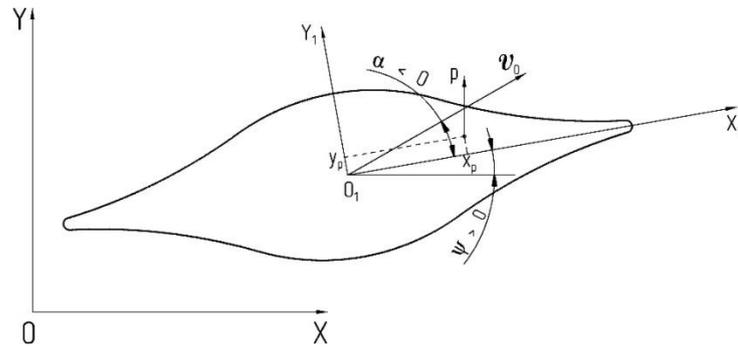


Рис. 10. Используемые системы координат

В работе [15] были получены соотношения для оценки оптимальных параметров движения глайдера с заданной формой корпуса. Следуя классической теории несущей поверхности, запишем формулу для гидродинамического качества в виде:

$$K = \frac{c_y^\alpha \alpha}{c_x^0 + c_x^{\alpha^2} \alpha^2} \quad , \quad (12)$$

Дифференцируя (12) по углу атаки и приравнивая эту производную нулю, нетрудно найти оптимальный угол атаки α_{opt} , обеспечивающий максимальное гидродинамическое качество и максимальную дальность планирования. А также соответствующие этому углу значения коэффициента подъемной силы c_{yopt} и максимального гидродинамического качества K_{max} . Имеем:

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{c_x^0}{c_x^{\alpha^2}}} \quad ; \quad c_{yopt} = c_y^\alpha \sqrt{\frac{c_x^0}{c_x^{\alpha^2}}} \quad ; \quad K_{max} = \frac{c_y^\alpha}{2\sqrt{c_x^{\alpha^2} c_x^0}} \quad . \quad (13)$$

Если оптимальный режим планирования реализуется, то соответствующая ему скорость на траектории равна:

$$v_{opt} = \sqrt{\frac{2p}{\rho_w V^{2/3} \sqrt{\frac{(c_y^\alpha)^2}{c_x^{\alpha^2}} c_x^0 + 4(c_x^0)^2}}} \quad . \quad (14)$$

Для глайдера модифицированной формы оптимальное значение угла атаки α_{opt} при котором реализуется максимальное гидродинамическое качество составляет: $\alpha_{opt} = 7,51^\circ$, $K_{max} = 6,62$.

4. Результаты моделирования движения глайдера. Как отмечалось выше, движение глайдера осуществляется за счет работы механизмов изменения плавучести и тонкой дифферентовки. Вначале рассмотрим режим маневрирования глайдера в вертикальной плоскости ХОУ. Режим погружения осуществляется за счет смещения штоков поршней гидроцилиндров 1 и 2 на прием заборной воды (рис. 11а).

При этом глайдер получает отрицательную плавучесть соответствующую $0,002 \text{ м}^3$. Из простейших геометрических соображений могут быть определены координаты равнодействующей точки приложения отрицательной избыточной плавучести:

$$x_p = 475\sqrt{2} - \frac{475 - 180}{\sqrt{2}} = 400\text{мм}; \quad y_p = 0; \quad z_p = 0. \quad (15)$$

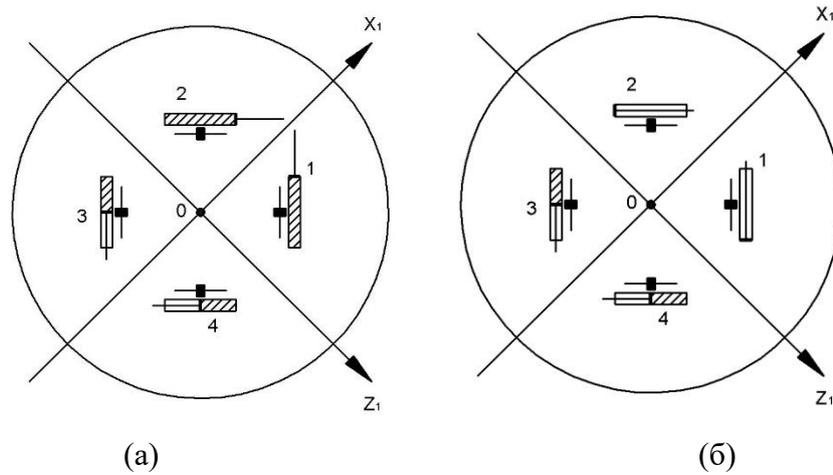


Рис. 11. Схемы работы механизма изменения плавучести в режиме погружения (а) и всплытия (б) глайдера в вертикальной плоскости без задействования механизма тонкой дифферентовки

Всплытие осуществляется за счет удаления воды из гидроцилиндров 1 и 2 (рис. 11б), тогда:

$$x_p = 475\sqrt{2} - \frac{475 + 180}{\sqrt{2}} = 272\text{мм}; \quad y_p = 0; \quad z_p = 0. \quad (16)$$

Для выхода на оптимальный угол атаки при погружении – всплытии глайдера возможно задействование механизма тонкой дифферентовки. При погружении все дифферентующие грузы смещаются в направлении оси Ox_1 (рис. 12а), а при всплытии – в обратном направлении (рис. 12б).

Плечи дифферентующего момента от смещения грузов при погружении:

$$\tilde{x}_p = \frac{1}{4} \left[2 \left(400\sqrt{2} - \frac{400 - 130}{\sqrt{2}} \right) - 2 \left(400\sqrt{2} - \frac{400 + 130}{\sqrt{2}} \right) \right] = 92\text{мм}; \quad \tilde{y}_p = 0; \quad \tilde{z}_p = 0. \quad (17)$$

Значения плеч дифферентующего момента при всплытии (см рис. 12б) равны:

$$\tilde{x}_p = -92\text{мм}; \quad \tilde{y}_p = 0; \quad \tilde{z}_p = 0. \quad (18)$$

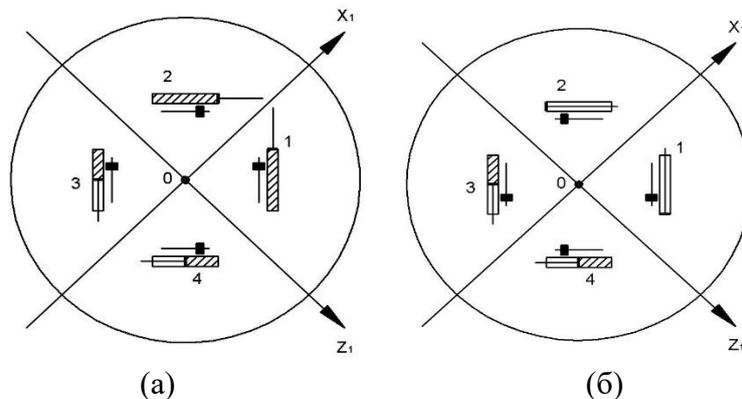


Рис. 12. Схемы работы механизма изменения плавучести в режиме погружения (а) и всплытия (б) глайдера в вертикальной плоскости с задействованием механизма тонкой дифферентовки

На приведенных ниже рисунках (рис.13-15) приведены параметры движения глайдера с модифицированной формой корпуса при действии знакопеременной избыточной плавучести с периодом 300 секунд. Отметим, что такое резкое изменение плавучести является модельным, в практических расчетах при определении изменения плавучести следует учитывать расходные характеристики насоса. В качестве начальных условий задавалась скорость движения глайдера 0,2 м/с с нулевым дифферентом. Слева приведены графики параметров движения глайдера без задействования механизма тонкой дифферентовки, справа с задействованием механизма тонкой дифферентовки.

Как показывают результаты моделирования, задействование механизма тонкой дифферентовки немного уменьшает угол атаки глайдера в установившемся движении и приближает его к оптимальному значению. При этом увеличиваются скорость движения глайдера и, соответственно, пройденный им путь.

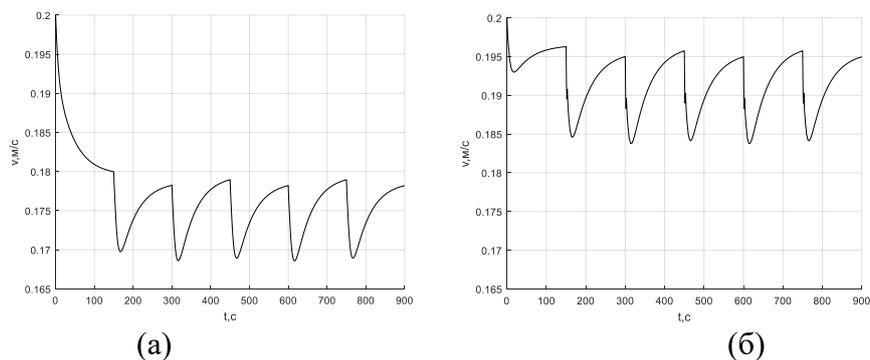


Рис. 13. Зависимость скорости движения глайдера от времени: (а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки; (б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки

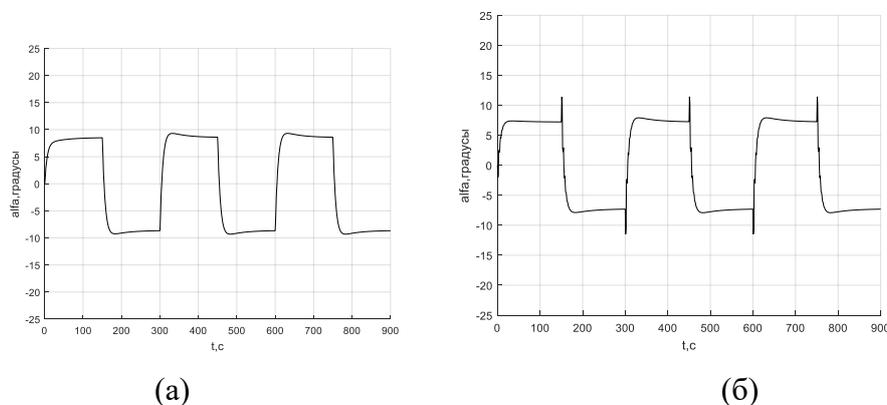


Рис. 14. Зависимость угла атаки глайдера от времени: (а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки; (б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки

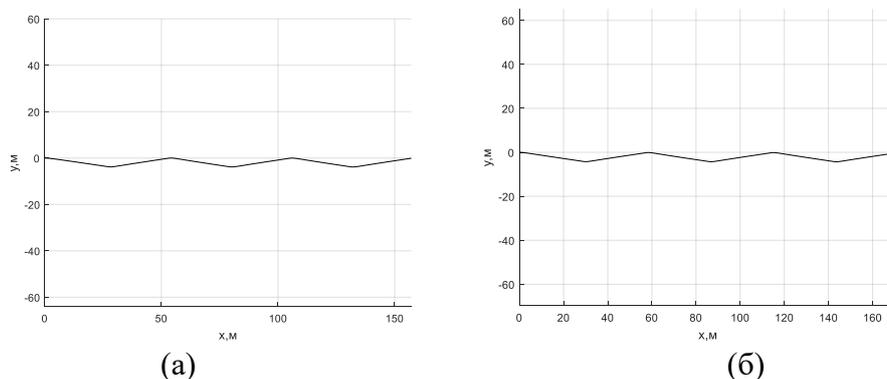


Рис. 15. Траектория движения глайдера: (а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки; (б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки

Пространственное маневрирование глайдера по курсу осуществляется за счет смещения точки приложения равнодействующей силы избыточной плавучести относительно оси OX_1 на плечо z_p . Схема работы механизма избыточной плавучести при погружении глайдера с креном на правый борт приведена на рис.16а.

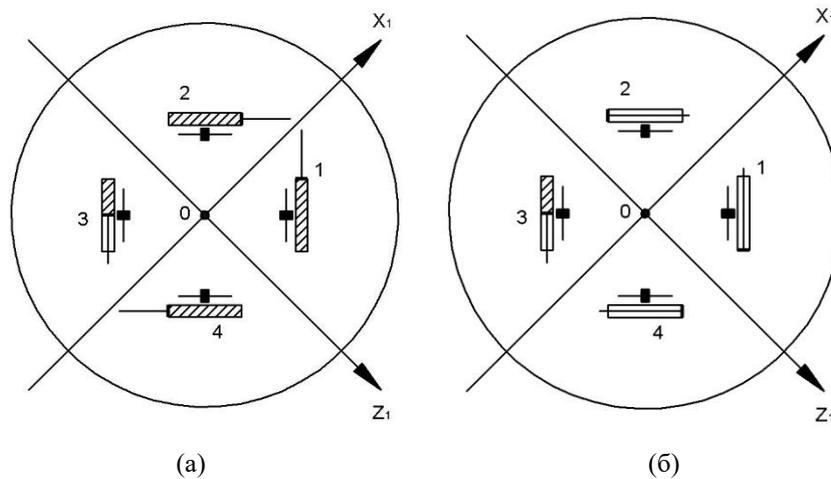


Рис. 16. Схемы работы механизма изменения плавучести при маневрировании по курсу в режиме погружения (а) и всплытия (б) глайдера без задействования механизма тонкой дифферентовки

При этом забортная вода принимается в гидроцилиндры 1, 2 и 4. Значения плеч, соответствующие приему в гидроцилиндр 4 объема воды $0,001\text{м}^3$, равны:

$$x_{p4} = - \left(475\sqrt{2} - \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} \right) = -400\text{мм} ; y_{p4} = 0; z_{p4} = \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} = 272\text{мм}. \quad (19)$$

Тогда плечи точки приложения равнодействующей силы отрицательной плавучести, соответствующей приему забортной воды $0,003\text{м}^3$ равны:

$$x_p = \frac{1}{3} \left[2 \left(475\sqrt{2} - \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} \right) - \left(475\sqrt{2} - \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} \right) \right] = 133\text{мм} ; y_p = 0; z_p = \frac{1}{3} \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} = 91\text{мм}. \quad (20)$$

Всплытие с креном на левый борт осуществляется за счет удаления воды из гидроцилиндров 1,2 и 4 (рис.16б). Значения плеч положительной избыточной плавучести, соответствующие удалению из гидроцилиндра 4 объема воды $0,001\text{м}^3$, равны:

$$x_{p4} = - \left(\frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} \right) = -272\text{мм} ; y_{p4} = 0; z_{p4} = 475\sqrt{2} - \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} = 400\text{мм}. \quad (21)$$

Тогда плечи точки приложения равнодействующей силы положительной плавучести, соответствующей удалению воды $0,003\text{м}^3$, равны:

$$x_p = \frac{1}{3} \left[2 \left(475\sqrt{2} - \frac{475 + \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} \right) - \left(\frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} \right) \right] = 91 \text{ мм}; \quad y_p = 0;$$

$$z_p = \frac{1}{3} \left(475\sqrt{2} - \frac{475 - \frac{180}{2}}{\sqrt{2}} \right) = 133 \text{ мм.} \quad (22)$$

Маневрирование в противоположную по курсу сторону осуществляется аналогичным образом за счет задействования гидроцилиндра 3. На приведенных ниже рисунках (рис. 17-19) приведены параметры движения глайдера с модифицированной формой корпуса при действии знакопеременной избыточной плавучести с периодом 300 секунд. После 450 секунд осуществлялась смена курса на противоположный. Слева приведены графики параметров движения глайдера без задействования механизма тонкой дифферентовки, справа с задействованием механизма тонкой дифферентовки (рис.17).

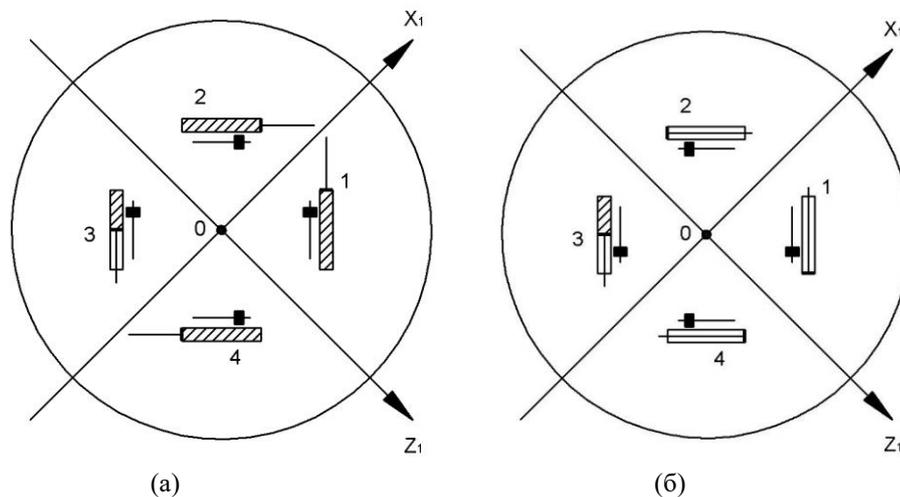


Рис. 17. Схемы работы механизма изменения плавучести при маневрировании по курсу в режиме погружения (а) и всплытия (б) глайдера с задействованием механизма тонкой дифферентовки

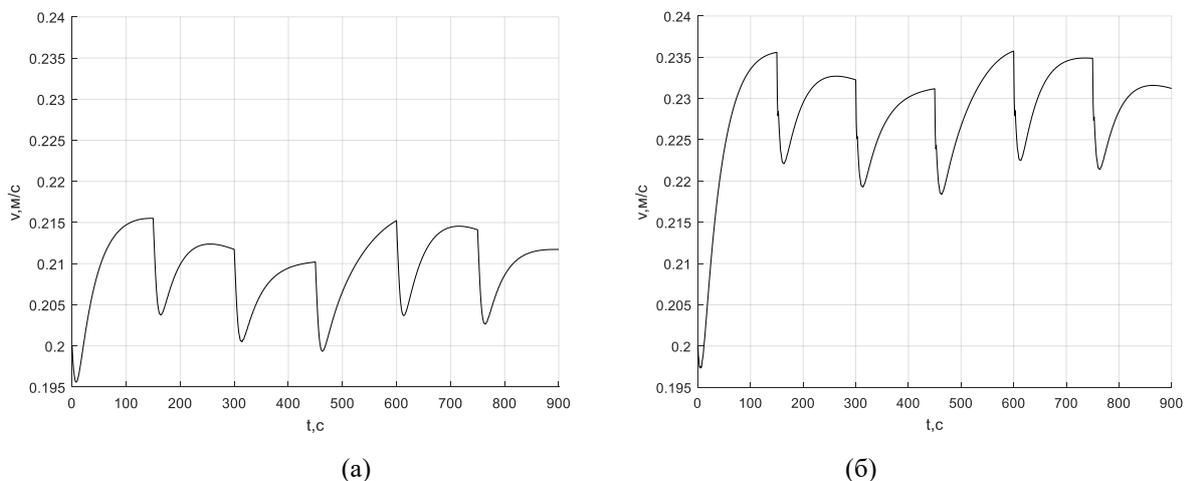


Рис. 18. Зависимость скорости движения глайдера от времени при маневрировании по курсу: (а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки; (б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки

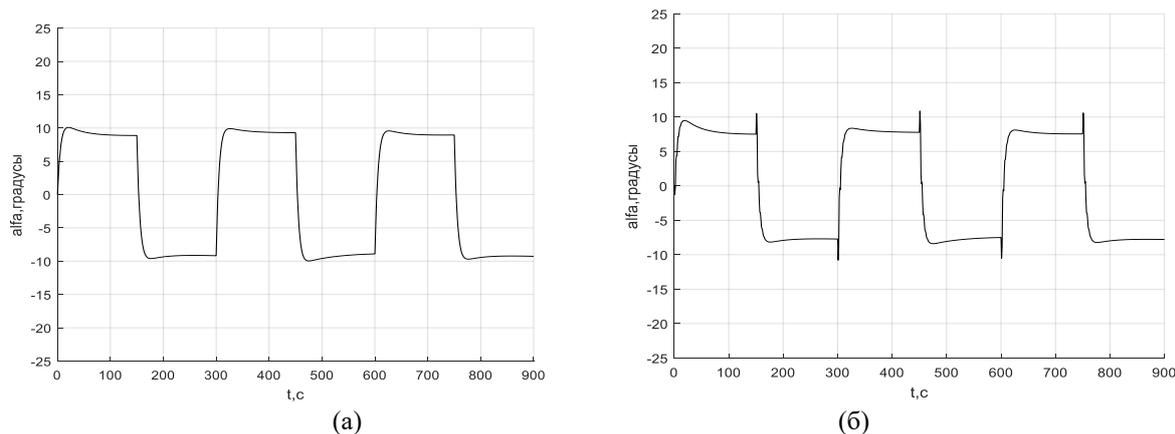


Рис. 19. Зависимость угла атаки глайдера от времени при маневрировании по курсу:
 (а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки;
 (б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки

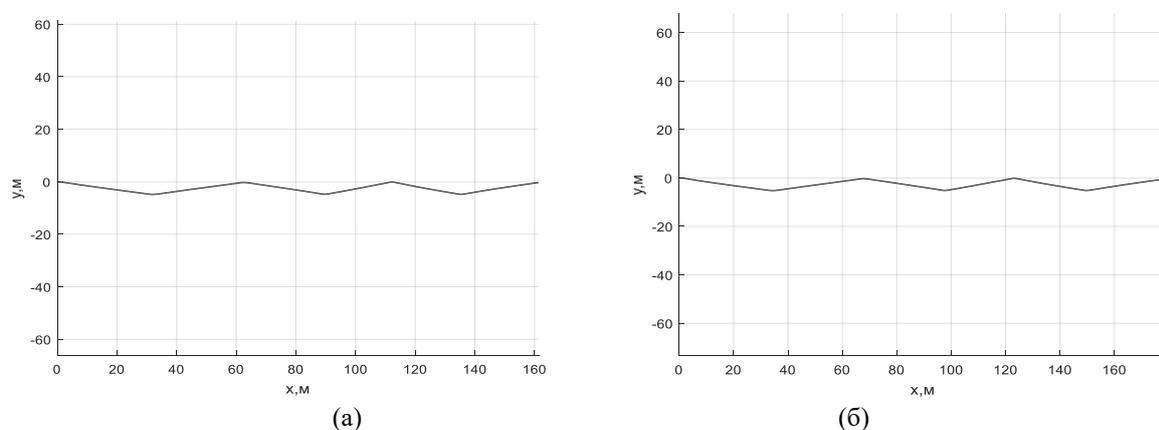


Рис. 20. Траектория движения глайдера в плоскости XOY:
 (а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки;
 (б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки

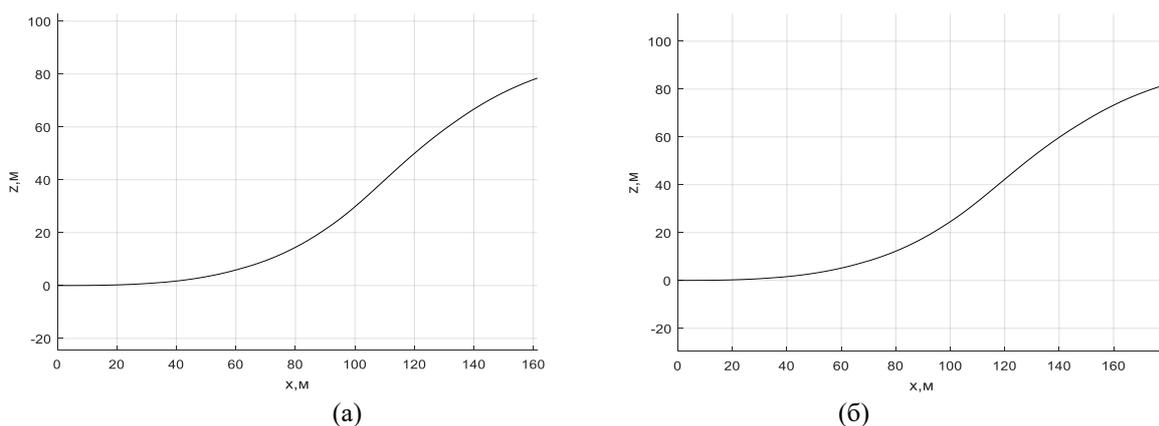


Рис. 21. Траектория движения глайдера в плоскости XOZ: (а) – без задействования механизма тонкой дифферентовки; (б) – с задействованием механизма тонкой дифферентовки

Результаты моделирования показывают, что скорость движения глайдера при маневрировании по глубине и курсу увеличивается по сравнению со случаем движения лишь в вертикальной плоскости за счет увеличения абсолютного значения избыточной плавучести ($0,003\text{м}^3$). Как и ранее, задействование механизма тонкой дифферентовки немного уменьшает угол атаки глайдера в установившемся движении и приближает его к оптимальному значению. При этом увеличиваются скорость движения глайдера и, соответственно, пройден-

ный им путь. Маневрирование глайдера по курсу происходит достаточно эффективно как с задействованием, так и без задействования механизма тонкой дифферентовки.

Заключение. В работе проведен анализ параметров движения подводного глайдера модифицированной дискообразной формы как при маневрировании в вертикальной плоскости, так и в пространстве. Показано, что введение в конструкцию механизма тонкой дифферентовки позволяет оптимизировать угол атаки глайдера. Определены схемы работы механизмов изменения плавучести и тонкой дифферентовки, обеспечивающие устойчивое маневрирование глайдера дискообразной формы по глубине и курсу. Отметим, что представленный подход позволяет рассматривать и иные схемы размещения гидроцилиндров, направляющих стержней и дифферентовочных грузов в корпусе глайдера.

Таким образом, показана принципиальная возможность осуществления пространственного устойчивого маневрирования подводного глайдера дискообразной формы за счет работы механизма изменения плавучести.

Список источников

1. Koterayama W., Nakamura M., Ito Y., Yoshimura H. Autonomous underwater vehicle for practical use in ocean observations. Proceedings of the tenth (2012) ISOPE pacific/Asia offshore mechanics symposium. Vladivostok, Russia, October 3-5, 2012, pp. 170-175.
2. Сухоруков А.Л. Об устойчивости подводного планера – глайдера на балансировочных режимах движения / А.Л. Сухоруков, М.А. Титов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2016. – № 3. – С. 66-79.
3. Сухоруков А.Л. Об использовании численных методов динамики вязкой жидкости для определения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов / А.Л. Сухоруков, М.А. Титов, И.А. Чернышев // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2016. – № 2. – С. 52-61.
4. Сухоруков А.Л. Теория подводных тросовых систем и ее инженерные приложения / А.Л. Сухоруков // М.: Физматлит, 2017. – 272 с.
5. Патент № 2731817 Российская Федерация, МПК В63В 71/00 (2020.01), В63Н 25/00 (2006.01), G06F 30/15 (2020.01). Способ определения демпфирующих гидродинамических характеристик подводного объекта: №2020108419: заявл. 26.02.2020: опубл. 08.09.2020 / Сухоруков А.Л., Чернышев И.А.; заявитель ЦКБ МТ «Рубин». – 12 с.
6. Патент № 2746488 Российская Федерация, МПК В63Н 25/00 (2006.01), G05D 11/00 (2006.01), В63G 8/00 (2006.01). Способ определения позиционных гидродинамических характеристик подводного объекта: №2020125700: заявл. 27.07.2020: опубл. 14.04.2021 / Сухоруков А.Л., Титов М.А.: заявитель ЦКБ МТ «Рубин». – 14 с.
7. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. // М.: Мир, 1990. – т. 2. – 384 с.
8. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости / К. Флетчер // М.: Мир, 1991. – т. 2 – 552 с.
9. Рихтмайер Р. Численное решение задач гидромеханики / Р. Рихтмайер // М.: Мир, 1977. – 208 с.
10. Олдер Б. Вычислительные методы в гидродинамике / Б. Олдер, С. Фернбах, М. Ротенберг // М.: Мир, 1967. – 384 с.
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг // М.: Наука, 1974. – 712 с.
12. Короткин А.И. Присоединенные массы судостроительных конструкций / А.И. Короткин // СПб.: Морвест, 2007. – 448 с.
13. Пантов Е.Н. Основы теории движения подводных аппаратов / Е.Н. Пантов, Н.Н. Махин, Б.Б. Шереметов // Л.: Судостроение, 1973. – 216 с.
14. Рождественский В.В. Динамика подводной лодки / В.В. Рождественский // Л.: Судостроение, 1970. – т. 1. – 352 с.
15. Рождественский К.В. Параметрический анализ установившегося движения подводного глайдера в вертикальной плоскости / К.В. Рождественский // *Морские интеллектуальные технологии*, 2016. – т. 2. – № 3(33). – С. 7-14.

Сухоруков Андрей Львович. Доктор технических наук, заместитель начальника проектного отдела АО «Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин», AuthorID: 446484, SPIN: 5811-3828, su_andr@yahoo.com, 191119, Санкт-Петербург, ул. Марата, 90.

Титов Максим Александрович. Инженер 1 категории высшей квалификации проектного отдела АО «Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин», 191119, Санкт-Петербург, ул. Марата, 90.

Analysis of the spatial motion parameters of an underwater disk-shaped glider

Andrey L. Sukhorukov, Maxim A. Titov

Central Design Bureau for Marine Engineering «Rubin»,

Russia, Saint-Petersburg, *su_andr@yahoo.com*

Abstract. In this work, a mathematical model is built and the parameters of the spatial movement of a modified disk-shaped glider are determined when maneuvering in depth and course. The modification consisted in creating a profiled annular "groove" on the body of the glider. The introduction of this structural element reduces the value of the overturning moment and increases the damping moment, which, in turn, improves the stability parameters of the glider in the vertical plane. Maneuvering was carried out due to the operation of the mechanism for changing the buoyancy and the mechanism for fine trimming the glider. It is shown that the introduction of a fine trim mechanism into the design makes it possible to optimize the angle of attack of the glider. The schemes of operation of the mechanisms for changing buoyancy and fine trim were determined, which ensure stable maneuvering of a disk-shaped glider in depth and course.

Keywords: underwater glider, glider, three-dimensional maneuvering, disk-like shape, excessive buoyancy, motion stability, hydrodynamic quality, angle of attack

References

1. Koterayama W., Nakamura M., Ito Y., Yoshimura H. Autonomous underwater vehicle for practical use in ocean observations. Proceedings of the tenth (2012) ISOPE pacific/Asia offshore mechanics symposium. Vladivostok, Russia, October 3-5, 2012, pp. 170-175.
2. Sukhorukov A.L., Titov M.A. Ob ustoychivosti podvodnogo planera – glaydera na balansirovochnykh rezhimakh dvizheniy [On the stability of an underwater glider on balancing modes of motion]. Fundamental and applied hydrophysics, 2016, no. 3, pp. 66-79.
3. Sukhorukov A.L., Titov M.A., Chernishev I.A. On the use of numerical methods of viscous fluid dynamics to determine the coefficients of rotational derivatives of hydrodynamic forces and moments [Ob ispol'zovanii chislennykh metodov dinamiki vyazkoy zhidkosti dlya opredeleniya koeffitsiyentov vrashchatel'nykh proizvodnykh gidrodinamicheskikh sil i momentov]. Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika [Fundamental and Applied Hydrophysics], 2016, no. 2, pp. 52-61.
4. Sukhorukov A.L. Teoriya podvodnykh trosovykh sistem i yeye inzhenernyye prilozheniya [The theory of underwater cable systems and its engineering applications]. Moscow, Fizmatlit, 2017, 272 p.
5. Sukhorukov A.L., Chernishev I.A. Sposob opredeleniya dempfirovushchikh gidrodinamicheskikh kharakteristik podvodnogo ob'yekta [Method for determining the damping hydrodynamic characteristics of an underwater object]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2731817 (2020).
6. Sukhorukov A.L., Titov M.A. Sposob opredeleniya pozitsionnykh gidrodinamicheskikh kharakteristik podvodnogo ob'yekta [Method for determining the positional hydrodynamic characteristics of an underwater object]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2746488 (2021).
7. Anderson D., Tannehill J., Pletcher R. Vychislitel'naya gidromekhanika i teploobmen [Computational fluid mechanics and heat transfer]. M.: Mir, 1987, vol. 2, 384 p.
8. Fletcher K. Vychislitel'nyye metody v dinamike zhidkosti [Computational techniques for fluid dynamics]. M.: Mir, 1991, vol. 2, 552 p.
9. Rikhtmayyer R. Chislennoye resheniye zadach gidromekhaniki [Numerical methods in fluid dynamics]. M.: Mir, 1977, 208 p.
10. Older B., Fernbakh S., Rotenberg M. Vychislitel'nyye metody v gidrodinamike [Fundamental methods in hydrodynamics]. M.: Mir, 1967, 384 p.
11. Shlikhting G. Teoriya pogrannichnogo sloya [Theory of the boundary layer]. Moscow, Nauka [Science], 1974, 712 p.
12. Korotkin A.I. Prisoyedinennyye massy sudostroitel'nykh konstruksiy [Attached masses of shipbuilding structures]. Saint-Petersburg, Morvest, 2007, 448 p.
13. Pantov E.N., Makhin N.N., Sheremetov B.B. Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov [Fundamentals of the theory of movement of underwater vehicles]. Leningrad, Sudostroyeniye [Sudostroenie], 1973, 216 p.
14. Rozhdestvenskiy V.V. Dinamika podvodnoy lodki [Submarine dynamics]. Leningrad, Sudostroyeniye [Sudostroenie], 1970, vol. 1, 352 p.

15. Rozhdestvenskiy K.V. Parametricheskiy analiz ustanovivshegosya dvizheniya podvodnogo glaydera v vertikal'noy ploskosti [Parametric analysis of the steady motion of an underwater glider in the vertical plane]. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies], 2016, vol. 2, no. 3(33), pp. 7-14.

Andrey L. Sukhorukov. Doctor of Technical Sciences, Deputy Head of Department, Naval Architecture Department Central Design Bureau for Marine Engineering «Rubin», AuthorID: 446484, SPIN: 5811-3828, su_andr@yahoo.com, 191119, Saint-Petersburg, Marata str., 90.

Maxim A. Titov. Engineer high-level qualification, Naval Architecture Department Central Design Bureau for Marine Engineering «Rubin», 191119, Saint-Petersburg, Marata str., 90.

Статья поступила в редакцию 25.07.2022; одобрена после рецензирования 18.10.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 07/25/2022; approved after reviewing 10/18/2022; accepted for publication 11/25/2022.