

УДК 629.12

© А.Л. Сухоруков, М.А. Титов, 2012

ОАО Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин», Санкт-Петербург
su_andr@yahoo.com

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭФФЕКТА ПЛАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

В работе на основе численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса определены гидродинамические характеристики подводного планера – глайдера. Проведено их сопоставление с экспериментальными данными и показана возможность использования численных методов динамики вязкой жидкости для отработки формы таких объектов. Построена математическая модель движения глайдера. Рассмотрена возможность его использования в качестве буксировщика другого подводного объекта. Получены аналитические оценки параметров движения глайдера на установившихся режимах с учетом и без учета силы тяги.

Ключевые слова: подводный аппарат, планер, глайдер, численные методы, математическая модель движения, буксировка, избыточная плавучесть.

Сегодня возрос интерес к проектированию автономных необитаемых подводных аппаратов с нетрадиционными принципами движения. Среди таких аппаратов особое место занимают подводные планеры (глайдеры). Важным достоинством этого типа аппаратов по сравнению с другими является существенная экономия энергии, затрачиваемой на движение, а также пониженное значение шумности. Движение подводных планеров осуществляется за счет многократного создания знакопеременной избыточной плавучести. По данным открытых источников, на сегодняшний день за рубежом построены десятки подводных аппаратов, использующих эффект подводного планирования [1–5]. Так, глайдер RU27 провел в море 221 день, преодолев дистанцию в 7410 км между США и Испанией [1]. За это время он совершил около 22 000 погружений-всплытий (по 11 000 в каждую сторону), пройдя по вертикали около 2200 км. Свыше 1000 раз выходил на связь с берегом. В работе [2] проведена классификация глайдеров по реализованным конструктивным схемам изменения плавучести, приведен достаточно подробный обзор современных разработок глайдеров и их приложений для исследования океана. Проведено сопоставление трех типов глайдеров с точки зрения эффективности выполнения ими исследовательских миссий [3].

Одним из основных этапов при разработке таких аппаратов является выбор заданных гидродинамических характеристик, обеспечивающих эффективное планирование и соответственно движение аппарата. Если раньше отработка формы аппаратов проводилась в основном экспериментальными методами, то сегодня в связи с резким ростом производительности вычислительной техники появилась возможность «виртуальной» отработки формы аппарата с определением его гидродинамических характеристик численными методами.

В данной работе рассматривается подводный планер (глайдер) (рис.1) с формой, близкой к подводному планеру, приведенному в [1]. Для этого объекта имеются экспериментальные данные по продувкам в аэродинамической трубе НИИММ ЛГУ [6], что позволило сопоставить гидродинамические характеристики, полученные экспериментальным и расчетным путем и тем самым подтвердить возможность использования численных методов динамики вязкой жидкости для отработки формы таких объектов.

В работе [1] предложена идея использования подводных планеров (глайдеров) в качестве буксировщиков других подводных объектов. В данной работе на основе аналитических оценок представлены зависимости параметров движения от тяги, развиваемой глайдером, на установившихся режимах.

Определение массоинерционных и гидродинамических характеристик глайнера. Подводный планер (глайдер) представляет собой объект, выполненный по самолетной схеме. Длина

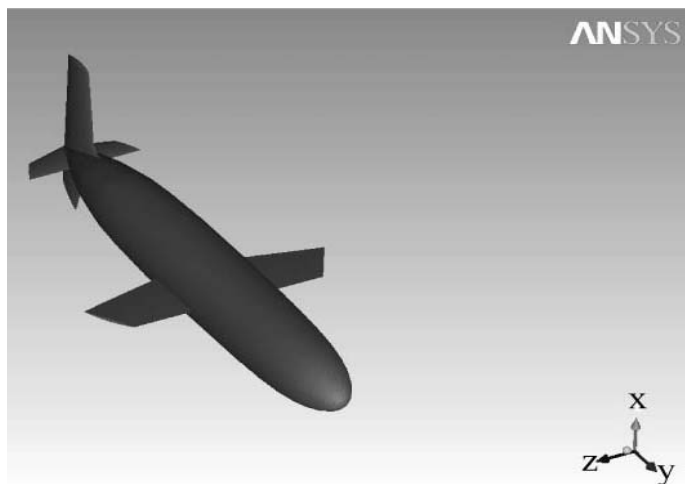


Рис. 1. Трехмерная модель подводного планера.

объекта 1167 мм, диаметр корпуса 178 мм, полное подводное водоизмещение $V = 0.022 \text{ м}^3$. Площадь крыльев 0.044 м^2 , кормового горизонтального оперения 0.014 м^2 . Координаты центра величины от носа $x_{цв} = 0.55 \text{ м}$, $y_{цв} = 0.001 \text{ м}$. Момент инерции объекта $J_{0z1} = 0.167 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Для данного объекта по методике [7] были определены присоединенные массы, при этом корпус объекта схематизировался эллипсоидом вращения, а крылья и стабилизаторы пластинами. В табл.1 приведены расчетные значения присоединенных масс объекта для его движения в вертикальной плоскости.

Таблица 1

	λ_{11} , кг	λ_{22} , кг	λ_{26} , кг·м ²	λ_{66} , кг·м ²
Корпус	1.05	19.53	-0.65	0.15
Крылья	—	2.43	0.01	0.05
Стабилизаторы	—	0.48	-0.27	0.15
Σ	1.05	22.44	-0.93	0.35

Гидродинамические характеристики определялись с использованием 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, по методике [8] определялись параметры сгущения узлов вычислительной сетки у поверхности объекта. Расчет проводился на основе Realizable $k - \varepsilon$ модели турбулентности с использованием и без использования пристеночных функций; кроме того, использовалась модель турбулентности Спаларта–Аллмараса. Для сопоставления результатов условия при расчете принимались соответствующими условиям при экспериментальном определении гидродинамических характеристик: скорость потока воздуха 30 м/с. Данная величина скорости обеспечивает подобие по числу Рейнольдса при движении объекта в воде. На входных границах расчетной области задавалась скорость набегающего потока, на выходных – статическое давление в потоке на бесконечности, на поверхности объекта ставились условия прилипания и непротекания. Расчет проводился для разных углов атаки. Определялись гидродинамические силы и моменты, действующие на объект. На рис.2 представлено распределение гидродинамических давлений по корпусу глайнера при углах атаки 0.10 и –10 градусов.

Коэффициенты позиционных гидродинамических сил и моментов определялись на основе следующих соотношений: в поточной системе координат (соответствующей экспериментальным данным)

$$F_x = c_x \frac{\rho_w v_0^2}{2} S; \quad F_y = c_y \frac{\rho_w v_0^2}{2} S; \quad M_z = m_{z1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} SL,$$

где ρ_w – плотность; v_0 – скорость набегающего потока; S – характерная площадь (площадь миделевого сечения корпуса); L – характерная длина (диаметр корпуса); в связанной системе координат

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

где V – водоизмещение объекта.

На рис.3 сопоставляются расчетные и экспериментальные данные для коэффициентов позиционных гидродинамических сил и моментов в поточной системе координат. Представленные графики подтверждают адекватность численного метода и показывают возможность его применения для отработки формы таких объектов. При этом лучшее согласование расчетных и экспериментальных данных наблюдается при использовании модели турбулентности Спаларта–Аллмараса. Отметим, что большее расхождение при положительных углах атаки по сравнению с данными при отрицательных углах может быть связано с незначительными различиями в формах экспериментальной и «виртуальной» моделей (последняя строилась по чертежу, приведенному в [6] в малом масштабе), а также с погрешностями численной модели и, возможно, условиями проведения эксперимента.

На рис.4 показаны зависимости коэффициентов позиционных гидродинамических сил и моментов в связанной с объектом системе координат, которые используются в уравнениях движения глайдера.

Представленные графики показывают, что в диапазоне малых углов атаки α при составлении уравнений движения объекта можно вполне ограничиться линейными зависимостями коэффициентов позиционных гидродинамических сил и моментов от угла атаки: $c_{y1} = c_{y1}(0) + c_{y1}^{\alpha} \alpha$, $m_{z1} = m_{z1}(0) + m_{z1}^{\alpha} \alpha$. Если объект симметричен относительно горизонтальной плоскости, то $c_{y1}(0) = 0$, $m_{z1}(0) = 0$. Для заданного объекта производные коэффициентов позиционных гидродинамических сил на основе анализа графиков (рис.4) равны: $c_{y1}^{\alpha} = 3.71$, $m_{z1}^{\alpha} = 1.28$. В первом приближении предполагалось отсутствие зависимости коэффициента силы сопротивления от угла атаки: его значение составляет $c_{x1} = -0.0609$, отличие от соответствующего значения в поточной системе координат связано с различием характерных величин, на которые обезразмеривается данный параметр в разных системах координат.

Коэффициенты вращательных гидродинамических сил и моментов $c_{y1}^{\omega z1}$ и $m_{z1}^{\omega z1}$ определяются на основе соотношений

$$F_{y1}^{\omega} = c_{y1}^{\omega z1} \frac{\rho_w v_0}{2} \omega_{z1} V, \quad M_{z1}^{\omega} = m_{z1}^{\omega z1} \frac{\rho_w v_0}{2} \omega_{z1} V^{4/3}.$$

Значения этих коэффициентов брались на основе данных прототипа [3] и составляли: $c_{y1}^{\omega z1} = 0.664$, $m_{z1}^{\omega z1} = -0.522$.

Уравнения движения глайдера. Уравнения движения подводного объекта (глайдера) в вертикальной плоскости в режиме планирования в проекциях на оси связанной системы OX_1Y_1 имеют следующий вид [7, 9]:

$$(\rho_w V + \lambda_{11}) \frac{dv_{x1}}{dt} = c_{x1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3} + (\rho_w V + \lambda_{22}) v_{y1} \omega_{z1} + \lambda_{26} \omega_{z1}^2 + p \sin \psi;$$

$$\begin{aligned}
 (\rho_w V + \lambda_{22}) \frac{dv_{y1}}{dt} + \lambda_{26} \frac{d\omega_{z1}}{dt} &= c_{y1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3} + c_{y1}^{\omega z1} \frac{\rho_w v_0}{2} \omega_{z1} V - \\
 &- (\rho_w V + \lambda_{11}) v_{x1} \omega_{z1} + p \cos \psi; \\
 (J_{oz1} + \lambda_{66}) \frac{d\omega_{z1}}{dt} + \lambda_{26} \frac{dv_{y1}}{dt} &= m_{z1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V + m_{z1}^{\omega z1} \frac{\rho_w v_0}{2} \omega_{z1} V^{4/3} - \rho_w V g h \sin \psi - \\
 &- \lambda_{26} v_{x1} \omega_{z1} + p(x_p \cos \psi - y_p \sin \psi); \\
 \frac{d\psi}{dt} &= \omega_{z1};
 \end{aligned}$$

где ρ_w – плотность морской воды; V – водоизмещение объекта; v_{x1} – проекция вектора скорости объекта на ось $OX1$; v_{y1} – проекция вектора скорости объекта на ось $OY1$; v_0 – абсолютная величина вектора скорости объекта; ω_{z1} – угловая скорость вращения объекта относительно оси $OZ1$; J_{oz1} – момент инерции корпуса объекта относительно оси $OZ1$; $\lambda_{11}, \lambda_{22}$ – присоединенные массы корпуса объекта; λ_{26} – присоединенный статический момент корпуса объекта; λ_{66} – присоединенный момент инерции корпуса объекта; c_{x1}, c_{y1}, m_{z1} – коэффициенты позиционных гидродинамических сил и моментов; $c_{y1}^{\omega z1}, m_{z1}^{\omega z1}$ – коэффициенты вращательных гидродинамических сил и моментов; h – метацентрическая высота; p – избыточная плавучесть; x_p, y_p – плечи избыточной плавучести в связанной системе координат; ψ – угол дифферента.

Рассмотрим установившийся режим движения объекта под действием сил положительной плавучести p . В этом случае уравнения движения объекта могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned}
 c_{x1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3} + p \sin \psi &= 0; \\
 c_{y1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3} + p \cos \psi &= 0; \\
 m_{z1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V - \rho_w V g h \sin \psi + p(x_p \cos \psi - y_p \sin \psi) &= 0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Система алгебраических уравнений (1) имеет три неизвестных: α, ψ и v_0 . Для их определения из первого и второго уравнений найдем

$$\sin \psi = -\frac{1}{p} c_{x1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3}, \quad \cos \psi = -\frac{1}{p} c_{y1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3}. \tag{2}$$

После подстановки (2) в последнее уравнение системы (1) и приведения уравнения к безразмерному виду получим уравнение моментов с одним неизвестным:

$$\bar{x}_p c_{y1}(\alpha) - (\bar{y}_p + \frac{\bar{h}}{\bar{p}}) c_{x1}(\alpha) - m_{z1}(\alpha) = 0, \tag{3}$$

где $\bar{h} = \frac{h}{V^{1/3}}$ – безразмерная метацентрическая высота; $\bar{p} = \frac{p}{\rho_w V g}$ – относительная избы-

точная плавучесть; $\bar{x}_p = \frac{x_p}{V^{1/3}}; \bar{y}_p = \frac{y_p}{V^{1/3}}$ – безразмерные плечи приложения силы плавучести в связанной системе координат.

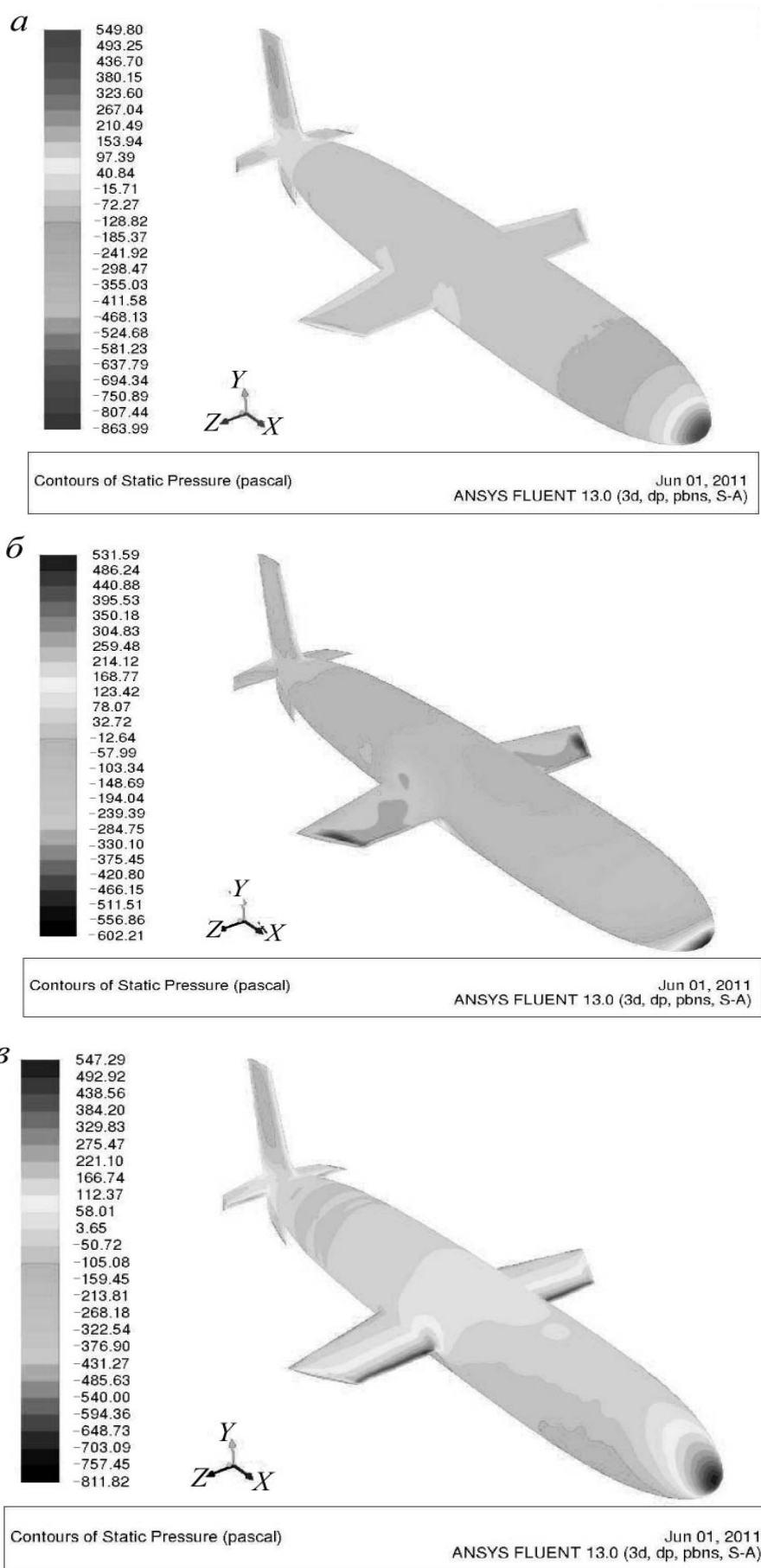


Рис.2. Распределение давления (в Па) по корпусу объекта при углах атаки: 0° (a), 10° (б) и -10° (в).

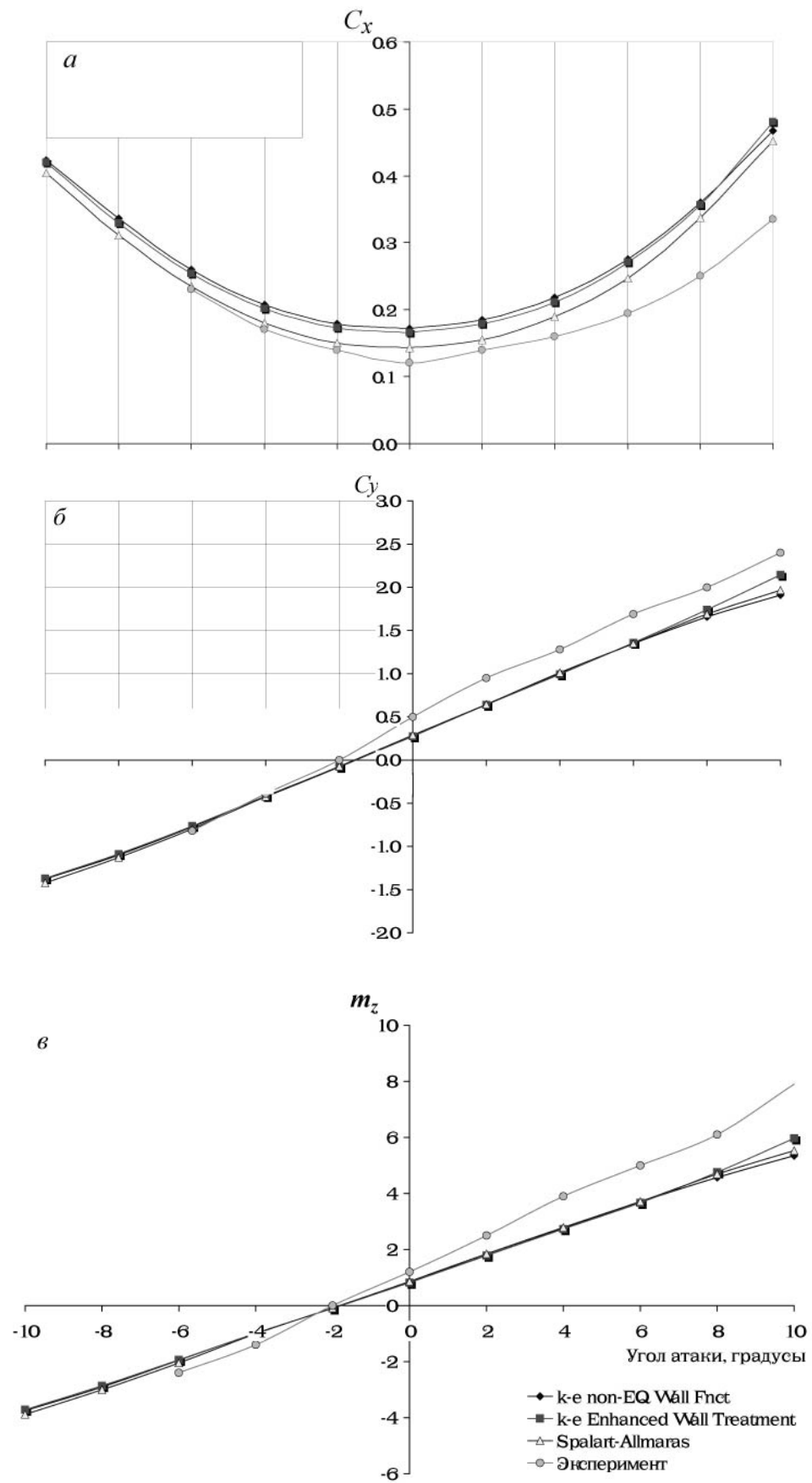


Рис.3. График изменения значений C_x (*a*), C_y (*б*) и m_z (*в*) в зависимости от угла атаки для различных моделей турбулентности в сравнении с экспериментом в поточной системе координат.

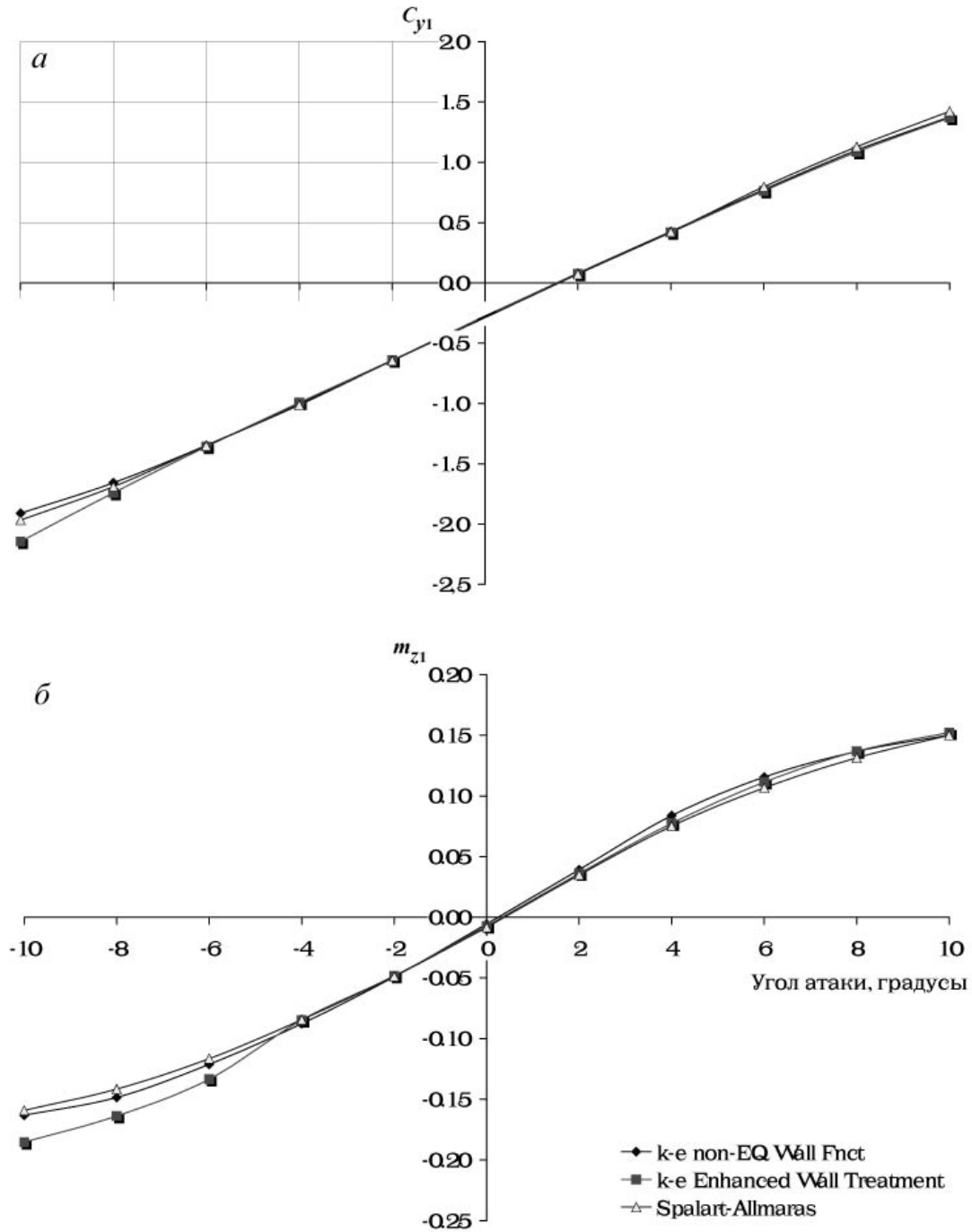


Рис.4. График изменения значений C_{y1} (a) и m_{z1} (б) в зависимости от угла атаки для различных моделей турбулентности в связанной системе координат.

С учетом сделанных выше допущений уравнение (3) может быть представлено в виде

$$\bar{x}_p c_{y1}^\alpha \alpha - \left(\bar{y}_p + \frac{\bar{h}}{\bar{p}} \right) c_{x1} - m_{z1}^\alpha \alpha = 0.$$

Тогда значение угла атаки при установившемся движении будет равно

$$\alpha = \frac{c_{x1} \left(\bar{y}_p + \frac{\bar{h}}{\bar{p}} \right)}{\bar{x}_p c_{y1}^\alpha - m_{z1}^\alpha}. \quad (4)$$

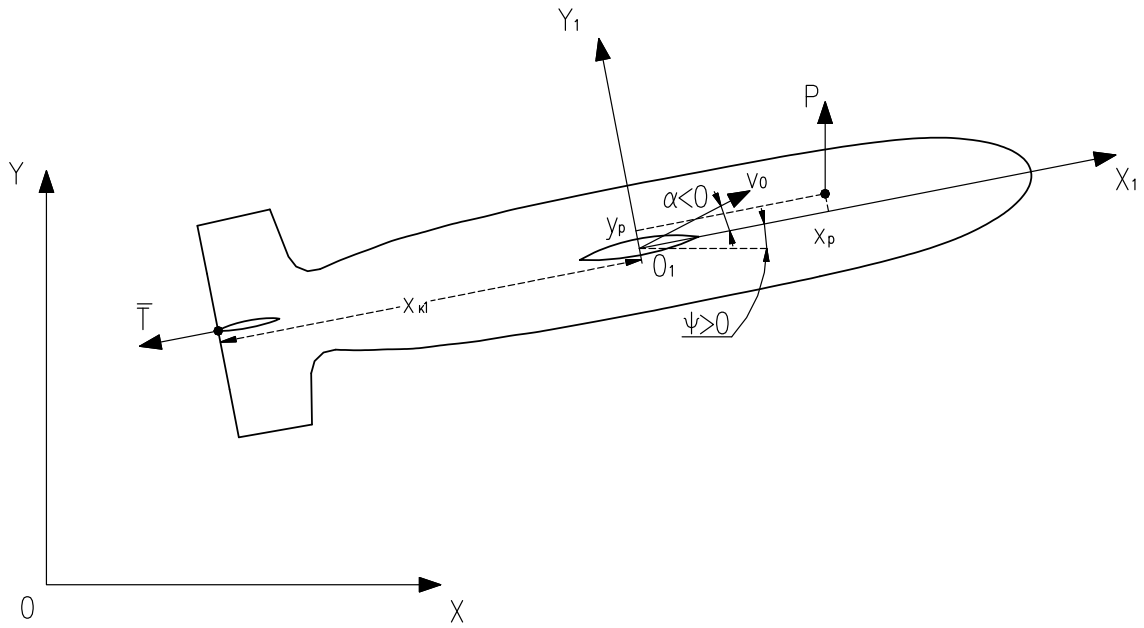


Рис.5. Используемые системы координат.

Установившееся значение угла дифферента определяется на основе соотношения

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{c_{x1}}{c_{y1}}. \quad (5)$$

Установившееся значение скорости определяется из соотношений (2):

$$p^2 = c_{x1}^2 \left(\frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3} \right)^2 + c_{y1}^2 \left(\frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3} \right)^2, \quad (6)$$

$$v_0^2 = \frac{2p}{\rho_w V^{2/3} \sqrt{c_{x1}^2 + c_{y1}^2}}. \quad (7)$$

Рассмотрим теперь движение подводного планера в режиме буксировщика другого объекта. В этом случае в правые части уравнений движения объекта войдут проекции силы, действующей со стороны буксирного троса на глайдер T_{x1} , T_{y1} в связанной системе координат и момент M_{T1} . Эта сила равна по модулю и направлена противоположно силе тяги глайдера.

Проекции силы, действующей со стороны буксирного троса на глайдер, и момент этой силы в связанной с объектом системе координат могут быть выражены через соответствующие проекции в неподвижной системе координат на основе соотношений

$$T_{x1} = T_x \cos \psi + T_y \sin \psi,$$

$$T_{y1} = -T_x \sin \psi + T_y \cos \psi,$$

$$M_{T1} = T_{y1} x_{k1} - T_{x1} y_{k1},$$

где T_x , T_y – проекции натяжения буксирной связи в клюзовой точке в неподвижной системе координат; x_{k1} , y_{k1} – координаты клюзовой точки в связанной с объектом системе координат.

В соответствии с [1] рассмотрим кильватерное положение глайдера и буксируемого объекта и предположим, что изменение кинематических параметров глайдера происхо-

дит медленно и его движение близко к установившемуся. В этом случае вертикальная проекция силы натяжения буксирного троса в клюзовой точке равна нулю: $T_y = 0$, а горизонтальную проекцию обозначим как $T_x = -\tilde{T}$. Тогда уравнения установившегося движения глайдера могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} c_{x1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3} + p \sin \psi - \tilde{T} \cos \psi &= 0; \\ c_{y1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3} + p \cos \psi + \tilde{T} \sin \psi &= 0; \end{aligned} \quad (8)$$

$$m_{z1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V - \rho_w V g h \sin \psi + p(x_p \cos \psi - y_p \sin \psi) + x_{k1} \tilde{T} \sin \psi + y_{k1} \tilde{T} \cos \psi = 0.$$

Выражая из первого уравнения системы (8) $\sin \psi$ и подставляя во второе, получим:

$$\begin{aligned} \sin \psi &= \frac{\tilde{T} \cos \psi - c_{x1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3}}{p}; \\ \cos \psi &= \frac{\frac{\tilde{T} c_{x1} \rho_w v_0^2}{2} V^{2/3} - c_{y1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3}}{p + \frac{\tilde{T}^2}{p}} = c_{x1} v_0^2 f_{11}(\tilde{T}, p) + c_{y1} v_0^2 f_{12}(\tilde{T}, p). \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогично для $\cos \psi$

$$\begin{aligned} \cos \psi &= \frac{-\tilde{T} \sin \psi - c_{y1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3}}{p}; \\ \sin \psi &= -\frac{\frac{\tilde{T} c_{y1} \rho_w v_0^2}{2} V^{2/3} + c_{x1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V^{2/3}}{p + \frac{\tilde{T}^2}{p}} = c_{x1} v_0^2 f_{21}(\tilde{T}, p) + c_{y1} v_0^2 f_{22}(\tilde{T}, p). \end{aligned} \quad (10)$$

Приведем последнее уравнение системы (8) к следующему виду:

$$\cos \psi (px_p + y_{k1} \tilde{T}) + \sin \psi (x_{k1} \tilde{T} - py_p - \rho V g h) + m_{z1} \frac{\rho_w v_0^2}{2} V = 0. \quad (11)$$

Подставляя в (11) выражения (9), (10) и сокращая на v_0^2 , получим линейное уравнение относительно α :

$$\begin{aligned} (c_{x1} f_{11}(\tilde{T}, p) + c_{y1}^\alpha \alpha f_{12}(\tilde{T}, p))(px_p + y_{k1} \tilde{T}) + \\ + (c_{x1} f_{21}(\tilde{T}, p) + c_{y1}^\alpha \alpha f_{22}(\tilde{T}, p))(x_{k1} \tilde{T} - py_p - \rho_w V g h) + m_{z1}^\alpha \alpha \frac{\rho_w}{2} V = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Данное уравнение позволяет определить установившееся значение угла атаки глайдера при заданных тяге $\tilde{T}$, плавучести p и координатах клюзовой точки.

Установившееся значение угла дифферента определяется на основе соотношения

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{c_{x1} f_{21}(\tilde{T}, p) + c_{y1}^{\alpha} \alpha f_{22}(\tilde{T}, p)}{c_{x1} f_{11}(\tilde{T}, p) + c_{y1}^{\alpha} \alpha f_{12}(\tilde{T}, p)}. \quad (13)$$

На основе первого из соотношений (8) может быть определено установившееся значение скорости глайдера:

$$v_0^2 = \frac{2}{c_{x1} \rho_w V^{2/3}} (\tilde{T} \cos \psi - p \sin \psi). \quad (14)$$

Результаты расчета. На рис.6–8 для глайдера с заданными характеристиками представлены параметры движения в режиме планирования. При этом значение относительной избыточной плавучести составляло $\bar{p} = \frac{p}{\rho_w V g} = -0.02$; координаты точки приложения силы плавучести относительно центра величины $x_p = 0.4$ м, $y_p = 0$ м; метацентрическая высота $h = 0.05$ м. В качестве начальных условий задавалась скорость движения глайдера, равная 1 м/с, с нулевым дифферентом. Видно, что спустя некоторое время глайдер выходит на режим установившегося планирования с отрицательным дифферентом 6.9° и положительным углом атаки 7.8° . В начальный момент наблюдаются колебания глайдера на собственной частоте, которые интенсивно затухают под влиянием демпфирующих сил и моментов. Параметры установившегося режима движения соответствуют зависимостям (4)–(7).

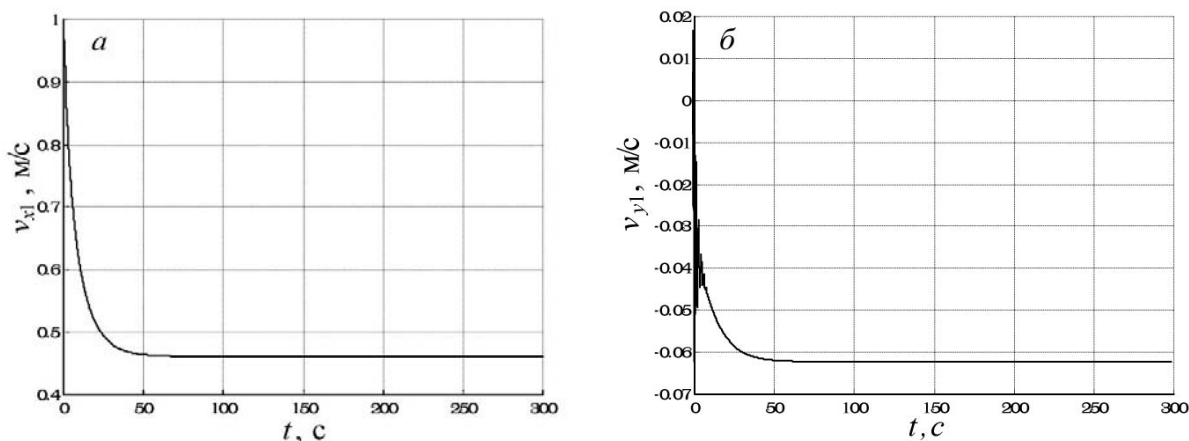


Рис.6. Зависимость продольной (а) и поперечной (б) компонент скорости глайдера от времени в связанной системе координат в режиме планирования.

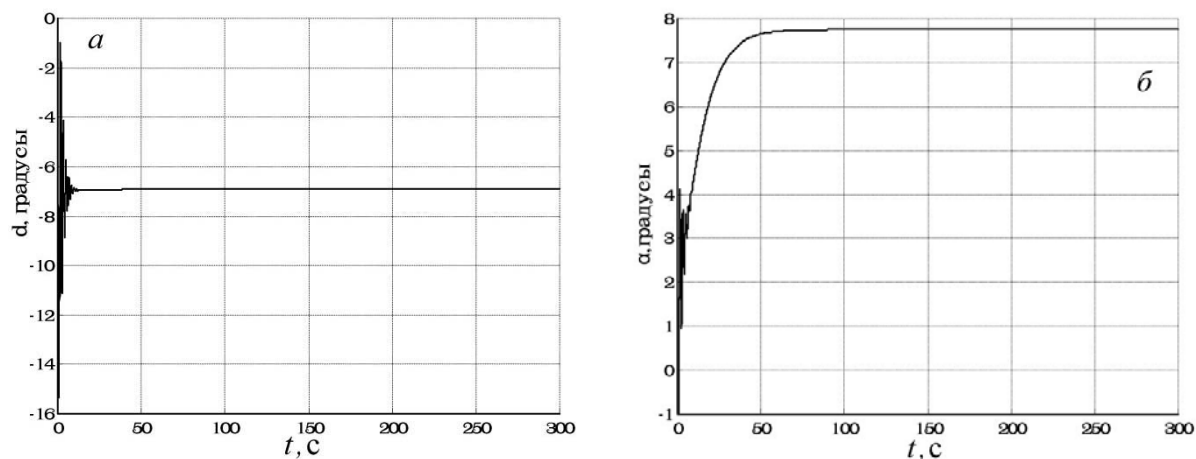


Рис.7. Зависимость дифферента (а) и угла атаки (б) глайдера от времени в режиме планирования.

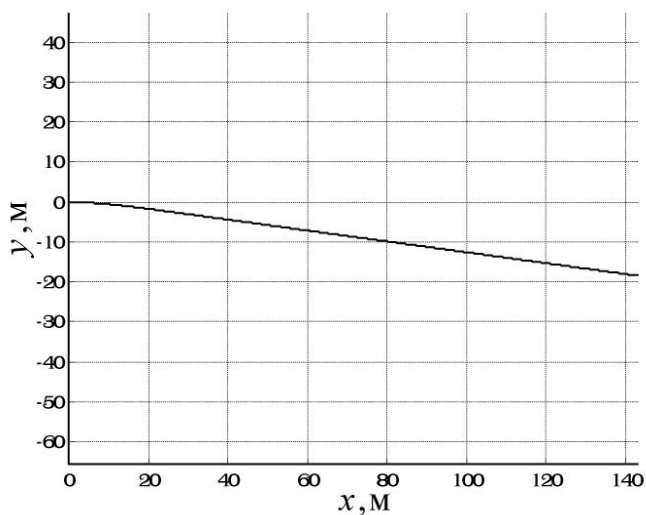


Рис.8. Траектория движения глайдера в режиме планирования.

На рис.9–11 приведены параметры движения глайдера при его работе в качестве буксировщика. При этом тяга глайдера $\tilde{T}$ составляла 5 % величины плавучести p и соответственно 0.1 % величины $\rho_w g V$. Координаты клюзовой точки крепления буксирного троса к глайдеру принимались $x_{k1} = -0.62$ м, $y_{k1} = 0$ м.

На рис.12, 13 с использованием соотношений (12)–(14) приведены зависимости установившихся значений параметров движения глайдера при варьировании тягой от 0 до 0.2 % величины $\rho_w g V$.

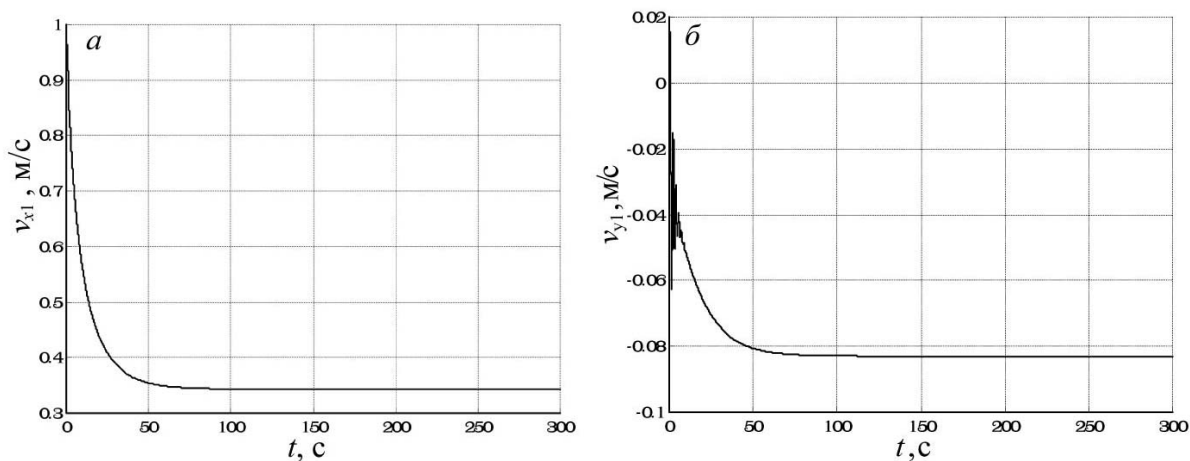


Рис.9. Зависимость продольной (а) и поперечной (б) компонент скорости глайдера от времени в связанной системе координат при его работе в качестве буксировщика.

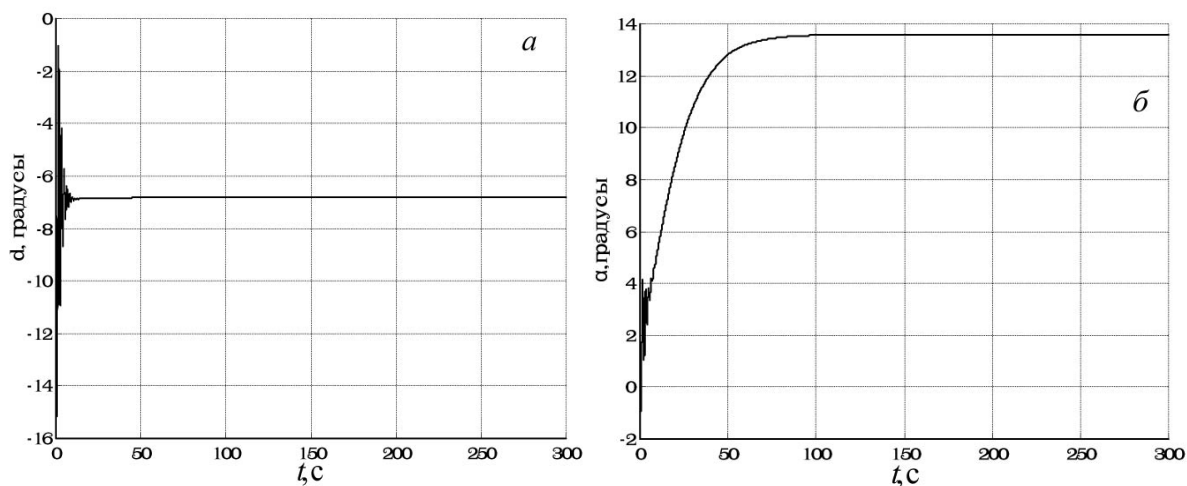


Рис.10. Зависимость дифферента (а) и угла атаки (б) глайдера от времени при его работе в качестве буксировщика.

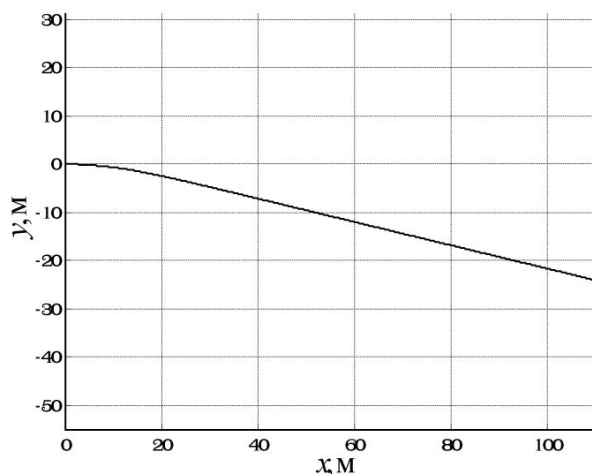


Рис.11. Траектория движения глайдера при его работе в качестве буксировщика.

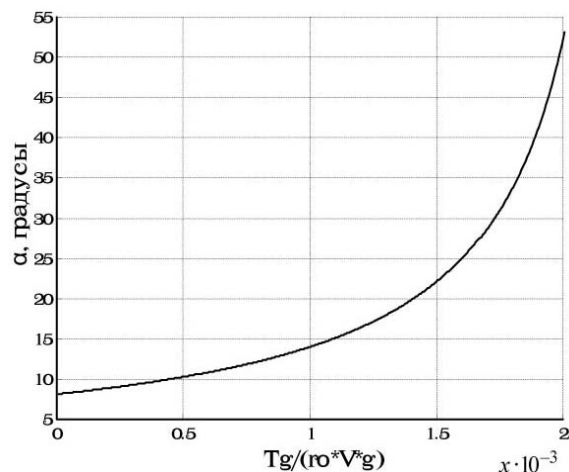


Рис.12. Изменение установившегося значения угла атаки глайдера при варьировании величиной тяги.

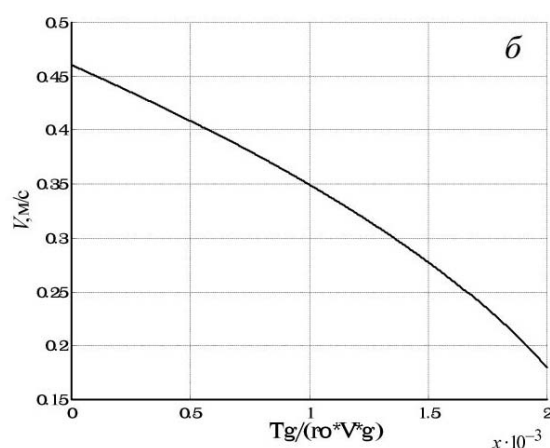
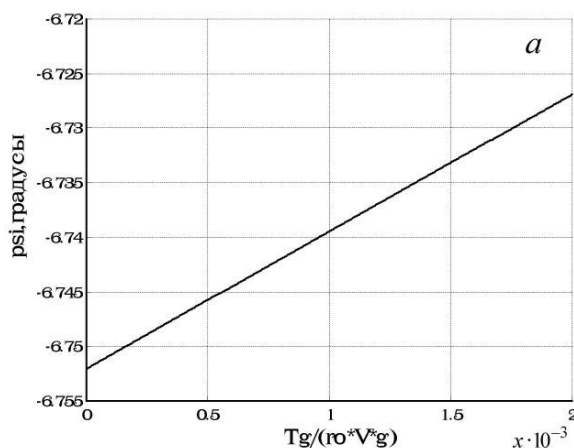


Рис.13. Изменение установившегося значения дифферента (а) и скорости (б) глайдера при варьировании величиной тяги.

Анализ зависимостей на рис.12, 13 показывает, что с увеличением тяги более 0.1 % от величины $\rho_w g V$ наблюдаются значительное увеличение угла атаки и падение скорости на установившемся режиме. При этом для столь больших значений углов атаки (около 50°) перестают быть справедливыми допущения о линеаризации гидродинамических характеристик глайдера. Таким образом, тягу в 0.1% величины $\rho_w g V$ нужно считать предельной для глайдера с заданными параметрами. Кроме того, следует отметить, что в моменты изменения величины плавучести и, соответственно, изменения направления движения глайдера по вертикали значение величины развиваемой глайдером тяги будет падать.

Слева на рис.14–16 показаны параметры движения глайдера при задании знакопеременной плавучести $\bar{p} = \frac{p}{\rho_w V g} = \pm 0.02$ с периодом 300 с. Отметим, что такое резкое

изменение плавучести является модельным, в практических расчетах при определении изменения плавучести следует учитывать расходные характеристики насоса. Величина тяги составляла 0.1 % величины $\rho_w g V$. Справа на этих же рисунках приведены параметры движения глайдера с увеличенными значениями знакопеременной плавучести

$\bar{p} = \frac{p}{\rho_w V g} = \pm 0.04$ и тяги 0.4 % величины $\rho_w g V$. Увеличение силы плавучести, даже при большем значении тяги, приводит к увеличению средней скорости движения глайдера,

угла дифферента и уменьшению угла атаки. Очевидно, что увеличение плавучести позволяет обеспечить большее значение развиваемой глайдером тяги.

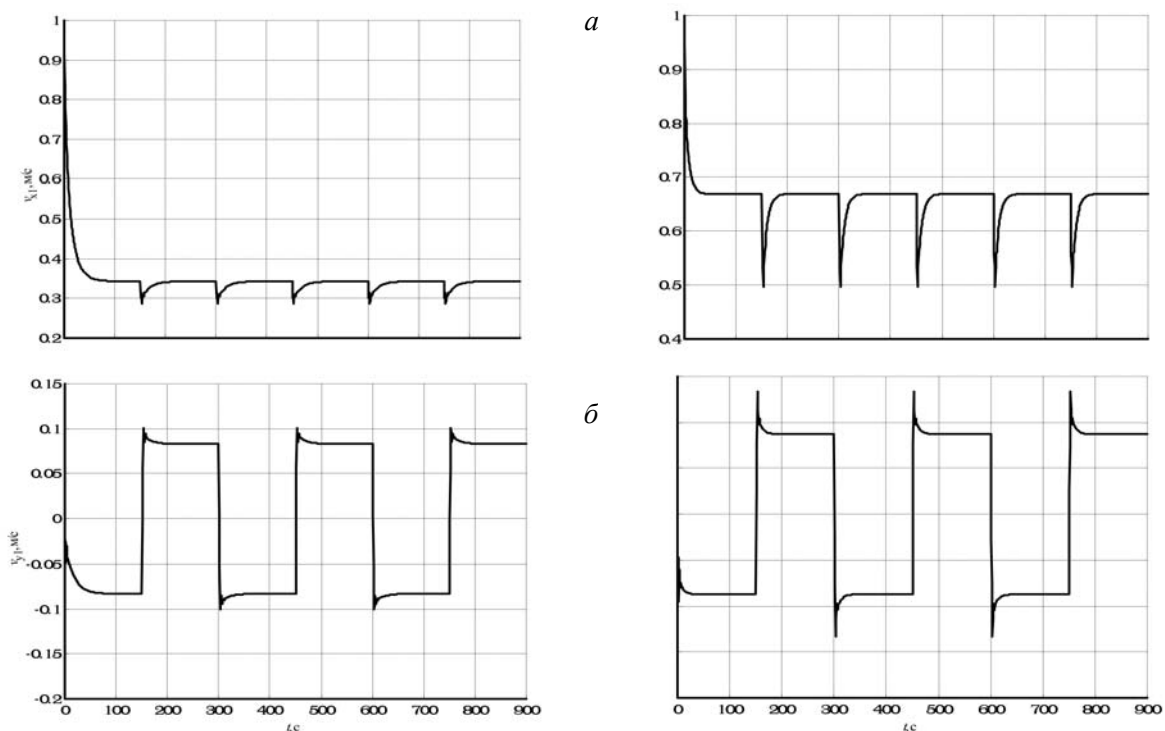


Рис.14. Зависимость продольной (а) поперечной (б) компоненты скорости глайдера от времени в связанной системе координат при задании знакомеременной плавучести.

Слева – $\bar{p} = \pm 0.02$; $\tilde{T} = 0.001\rho_w gV$; справа – $\bar{p} = \pm 0.04$; $\tilde{T} = 0.004\rho_w gV$.

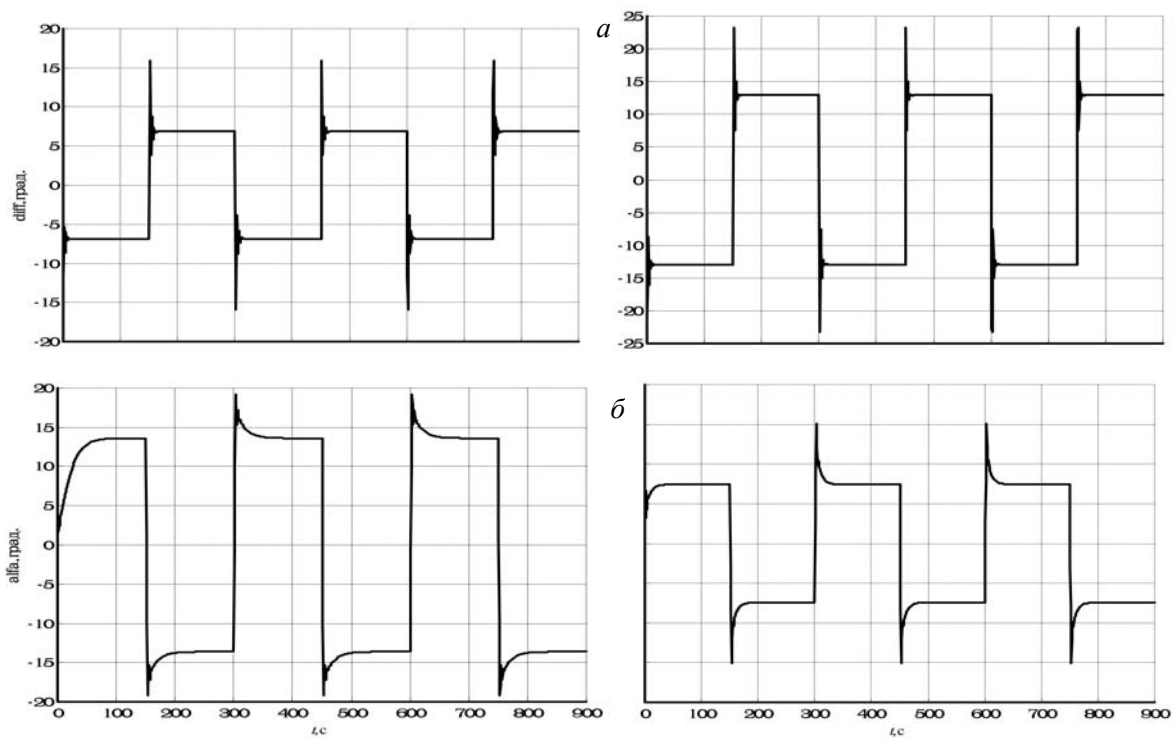


Рис.15. Зависимость дифферента (а) угла атаки (б) глайдера от времени при задании знакомеременной плавучести.

(Значения $\bar{p}$ и $\tilde{T}$ см. рис.14).

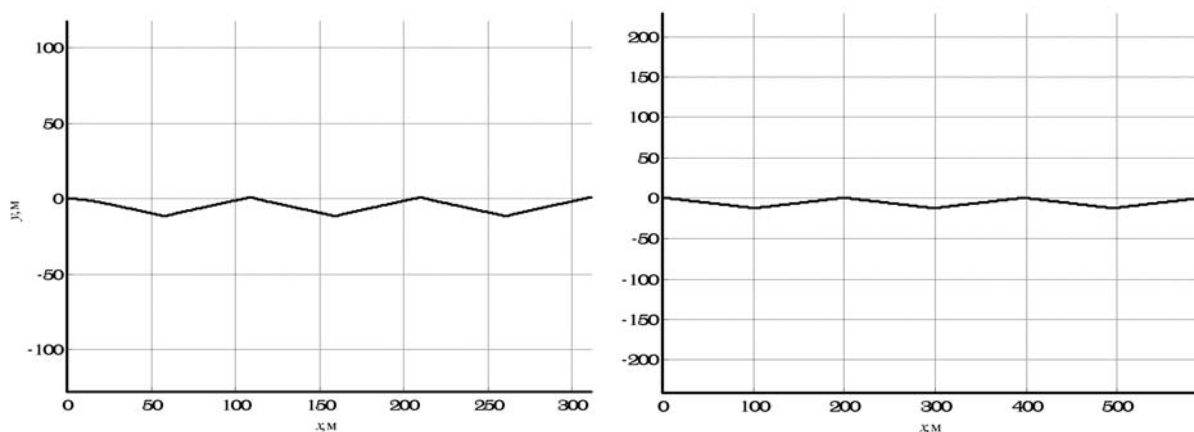


Рис.16. Траектория движения глайдера при задании знакопеременной плавучести.

(Значения $\bar{p}$ и $\tilde{T}$ см. рис.14).

В работе на основе численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса определены гидродинамические характеристики подводного планера – глайдера. Проведено их сопоставление с экспериментальными данными и показана возможность использования численных методов динамики вязкой жидкости для отработки формы таких объектов.

Построена математическая модель движения глайдера. Рассмотрена возможность его использования в качестве буксировщика другого подводного объекта. Получены аналитические оценки параметров движения глайдера на установившихся режимах с учетом и без учета силы тяги. Приведены зависимости параметров движения глайдера при действии знакопеременной избыточной плавучести. Показана возможность увеличения развиваемой глайдером тяги за счет увеличения избыточной плавучести.

Литература

1. Пинегин А.Н. О планировании под действием знакопеременной избыточной плавучести как способе движения подводных лодок и аппаратов. Юбилейный научно-технический отчет ЦКБ МТ «Рубин». СПб., 2011. С.49–60.
2. Wood Stephen L. Autonomous underwater gliders.// Underwater vehicles, Florida Institute of Technology. November 2008. P.505–529.
3. Rudnick D.L., Davis R.E., Eriksen C.C., Fratantoni D.M., Perry M.J. Underwater gliders for ocean research // Marine Technology Society Journal, Spring 2004. V.38, N 1. P.48–59.
4. Eriksen C.C., Osse T.J., Light R.D., Wen T., Lehman T.W., Sabin P.L., Ballard J.W., Ghiodi A.M. Seaglider: A long range autonomous underwater vehicle for oceanographic research // IEEE J. Oceanic Engin., 2001. V.26, Issue 4. P.424–436.
5. D'Spain G.L., Zimmerman R., Jenkins S.A., Luby J.C., Brodsky P. Underwater acoustic measurements with a flying wing glider // J. Acoust. Soc. Am. May 2007. V.121, N 5. Pt.2. P.3107.
6. Виноградов Н.И., Крейнделъ С.А., Лев И.Г., Нисневич М.З. Привязные подводные системы. Аэрогидродинамические характеристики при установившемся движении. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. 304 с.
7. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973. 216 с.
8. Сухоруков А.Л., Каверинский А.Ю. Опыт использования программного комплекса «Star-CD» при решении некоторых практических задач гидродинамики подводной лодки // Сб. тр. третьей конф. пользователей программного обеспечения CAD-FEM. М.: 2002. С.119–126.
9. Рождественский В.В. Динамика подводной лодки. Л.: Судостроение, 1970. Т.1. 352 с.

Статья поступила в редакцию 29.03.2012 г.

