ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Научный совет по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики

2012
том 5
№ 4

Издается с 2008 г.

Тематический выпуск

СОДЕРЖАНИЕ

Лучинин А.Г. О системах подводного видения со сложно модулированными пучками подсветки ……... 5

Лихачева М.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В. Модифицированный алгоритм атмосферной коррекции данных спутникового сканера MODIS …..……... 18

Триз Ч., Пеннучи Дж. Верификация вторичных оптических характеристик, восстанавливаемых планерами Слокама …….…..…… 26

Долин Л.С. Об искажениях импульсного светового пучка в среде с сильно анизотропным рассеянием……..... 30

Родионов М.А., Долина И.С., Левин И.М. Корреляции между вертикальными распределениями показателя ослабления света и плотности воды в Северных морях..... 39

Вазюля С.В., Копелевич О.В. Сравнительные оценки баланса фотосинтетически активной радиации в Баренцевом, Белом, Карском и Черном морях по данным судовых и спутниковых измерений..... 47

Фицек Д., Мелер Й., Западка Т., Стонь-Эгерт Й. Моделирование коэффициентов поглощения света фитопланктоном в озерах Померании (северная Польша)...……..... 54

Пеннучи Дж., Альварес А., Триз Ч. Спутниковый метод, основанный на ковариации, для поддержки деятельности AERONET – верификация данных по цвету океана……..... 64

Толкаченко Г.А., Калинская Д.В., Смирнов А.В., Прохоренко Ю.А. Оценка пространственных масштабов аэрозольной атмосферы над акваторией Черного моря…… 69

Левин И.М., Дарецкий М., Саган С., Ковальчук П., Здун А., Радомысльская Т.М., Родионов М.А. Можно ли применять к Балтийскому морю известные модели оптических свойств воды?……... 80

Сухоруков А.Л., Титов М.А. Об использовании эффекта планирования для движения подводных аппаратов……..….. 88

Конференции ……..……..……...…… 102

Тематический указатель 2012 г. 106

Авторский указатель за 2012 г. 108

Правила представления материалов в редакцию..... 109

CONTENTS

Articles

Luchinin A.G. On Underwater Imaging Systems with Complex Modulated Beams of Illumination…. 5

A scheme of construction of imaging systems based on a complex modulated illuminating beam and the received echo signal processing is proposed, which involves the extraction of the modulated component and its matched filtering is discussed. The approached model of a signal taking into account the effect of surface waves and multiple scattering in water is constructed. The system limiting longitudinal and transverse resolutions determined by random light refraction on the surface and scattering in water are estimated. Characteristics of imaging systems with extremely high frequency of beam modulation are estimated.
Key words: underwater imaging, modulated beams of light, dispersion of modulation waves, compression of complex signal, random refraction, wavy surface hydrodynamically rough.

Likhacheva M.V., Sheberstov S.V., Kopelevich O.V. Modified Algorithm of Atmospheric Correction for MODIS Satellite Data……...…… 18

New approach to MODIS data processing, joined of algorithm for sun glint area and low-parametric algorithm of atmospheric correction is presented. Software package processing MODIS imagery has been developed. Validation of this algorithm with in situ measurements of the water radiance reflectance $\rho(\lambda)$ in most cases shows better accuracy then the SeaDAS 6.1 data as in the presence of sun glint and without glint. As a result of applying of new algorithm, the area of solving the inverse problem increased.
Key words: atmospheric correction, sun glint, ocean color sensors.

Trees C., Pennucci G. About the Distrotions of the Pulsed Light Beam in the Medium with Strongly Anisotropic Scattering…….……...… 26

One of the principle advantages of gliders is that they provide high-resolution measurements at small temporal and spatial scales. They also autonomously operate 24/7 under a variety of weather and sea-state conditions, they increase sample measurement densities (shipboard sampling 87 profiles day-1 as compared to 665 profiles day-1 from a glider), they are relatively low cost, easily re-locatable and finally, they have low power requirements for extended deployment periods. The goals of this study were (1) to determine the radiometric uncertainty of downwelling irradiance (Ed) measurements made from gliders, (2) to apply the Submerged Remote Sensing (SRS) technique for calculating mean K's (average K over some depth interval from just below the surface to the sensor depth) from validated glider Ed data and (3) to invert mean K's to local K's (K over some smaller depth increment ~1–2 m to generate a vertical profile of K) under varying incident solar fluxes (cloud cover/atmospheric conditions).
Key words: slocum gliders, underwater irradiance, vertical attenuation coefficient.

Dolin L.S. About the Distrotions of the Pulsed Light Beam in the Medium with Strongly Anisotropic Scattering……...… 30

The method for analysis of spatially - temporal distortions of a pulsed light beam in the stratified turbid medium with narrow scattering phase function (in particular, sea water) is developed. It is shown that the radiative transfer equation in the refined small-angle approximation is reduced to a set of equations for longitudinal moments of a pulsed light field which is solved rigorously unlike the analogous equations for temporary moments of pulse. Recurrence relations, which permit to calculate the moments of the higher order based on the zero moment, are obtained. The formulas for calculating the first three moments, defining the average radiance (or irradiance), the distance between the leading front and the “centre of gravity” of pulse as well as the longitudinal scale of its smearing, are given. Formulas for definition of time characteristics of pulse from its spatial moments are obtained.
Key words: laser impulse, turbid medium, light scattering, radiative transfer equation, light field, a method of the moments.

Rodionov M., Dolina I., Levin I. Correlations Between Depth Distributions of Water Attenuation Coefficient and Density in the North Seas ……...…….. 39

The paper contains the data on measurements of depth distributions of attenuation coefficient and fluid density in the Barents, White and Kara Seas together with results of analysis the correlations between these distributions. We founded that in many cases correlations between parameters of the functions used for distributions approximation are rather high, namely, between the horizons of maximal change of attenuation coefficient and the pycnocline depth, between widths of pycnocline and the layer of attenuation coefficient jump, as well as between the gradient of c and the buoyancy frequency.
Key words: correlations, depth profiles, attenuation coefficient, fluid density.

Vasulia S.V., Kopelevich O.V. Comparative Estimates of the Budget of Photosynthetic Available Radiation (PAR) in the Barents, White, Kara and Black Seas Derived From *in situ* and Satellite Data……...… 47

The comparative assessment of all components of the PAR budget (incident on the sea surface, reflected from the rough sea surface, penetrating to the different depth in the water column, water-leaving and absorbed in water) made by using satellite and *in situ* data in the Barents, Black, Kara, and White seas is presented. Water quality is varied from clear with the diffuse attenuation coefficient $K_d(555) \approx 0.13$ m^{-1} to very turbid with $K_d(555) = 0.42$ m^{-1}. These differences cause the essential discrepancy of components of the PAR budget in different seas. An agreement between the estimates of PAR penetration in the upper layer derived from in situ and satellite data is quite satisfactory.
Key words: photosynthetic available radiation, PAR budget, satellite data.

Ficek D., Meler J., Zapadka T., Stoń-Egiert J. Modelling the Light Absorption Coefficients of Phytoplankton in Pomeranian Lakes (Northern Poland) ……...……...… 54

In 2004-08 the absorption properties of phytoplankton was measured in 15 northern Polish lakes of different trophicity. At the same time the concentrations of optically active substances in these lakes were also measured. These data were used to test the model of the absorption properties of phytoplankton, derived by Bricaud et al. for case 1 oceanic waters (hereafter referred to as Bricaud's parameterisation), to predict the spectra of light absorption by phytoplankton a_{ph} for lakes in Pomerania. This study shows the limitations of this model to lacustrine phytoplankton; and the reasons for them are discussed. In addition, an analogous model of light absorption by phytoplankton in the investigated lakes was derived on the same mathematical basis as Bricaud's model, but with different values of the relevant empirical parameters. For the sake of simplicity, the analysis covered the coefficients of light absorption only by surface water phytoplankton. The results were compared with those obtained for case 2 waters by other authors using similar models.
Key words: phytoplankton absorption spectra, lakes, bio-optical modelling.

Pennucci G., Alvarez A., Trees C. A Satellite Covariance-Based Method to Support AERONET Ocean Color Validation Activities ……...…..… 64

The objective is to determine the location(s) in any given oceanic area during different temporal periods where in situ sampling for Calibration/Validation (Cal/Val) provides the greatest improvement in retrieving accurate radiometric and derived product data (lowest uncertainties). A method is presented to merge satellite imagery with in situ samples and to determine the best in situ sampling strategy suitable for satellite Cal/Val efforts. This methodology uses satellite acquisitions to build a covariance matrix encoding the spatio-temporal variability of the area of interest. The covariance matrix is used in a Bayesian framework to merge satellite and in situ data providing a product with lower uncertainty. The best in situ location for Cal/Val efforts is retrieved using a design principle (A-optimum design) that looks for minimizing the estimated variance of the merged product.
Key words: satellite images, field measurements, calibration-validation, merged product.

Tolkachenko G.A., Kalinskaya D.V., Smirnov A.V., Prohorenko Y.A. Evalution of Spatial Scales of Aerosol Atmosphere over the Black Sea ……...…..… 69

Results of researches of spatial correlation of atmosphere optical heterogeneities above the Black sea are presented. Measurements of aerosol optical thickness are carried out by two spaced sun photometers. The spatial correlation radius of aerosol optical thickness is estimated and constitutes in order of 160 km. Possibility of revealing the absorbing aerosols properties above the sea is shown on a concrete examples. The recommendations on application of portable photometers in sub-satellite measured experiments are given.
Key words: aerosol, correction atmosphere, spatial correlation, undersattelite experiment.

Levin I., Darecki.M., Sagan S., Kowalczuk P., Zdun A., Radomyslskaya T., Rodionov M. Can the Known Models of Seawater Optical Properties Be Applied to the Baltic Sea?..... 80

Commonly used optical models of natural waters have been analyzed in the context of their applicability in the Baltic Sea. By use of a large data set collected at the Baltic, we found that published before relationships between scattering, attenuation and backscattering coefficients at wavelength 550 nm in ocean waters are valid for Baltic as well. When the same data were used for validation of the relationships connecting absorption and scattering coefficients of the chlorophyll and absorption coefficients of Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) with chlorophyll concentration, the result shows a large discrepancy, disqualifying them in the complicated environment of the Baltic Sea.
Key words: inherent optical properties, phytoplankton, yellow substance.

Sukhorukov A.L., Titov M.A. Use of Gliding Effect for Motion of Underwater Vehicles …..…..…… 88

This study defines hydrodynamic characteristics of underwater gliders based upon numeric solution of Reynolds-averaged Navier-Stokes equation. The characteristics were compared with experimental data and it was shown that it is possible to use numeric methods of viscous fluid dynamics for development of a shape of such objects. Mathematical model of glider's motion was designed. Feasibility of its use as a towing vehicle for another underwater object was studied. Analytical estimations of glider motion parameters were obtained at steady-state modes with and without account of towing force.
Key words: underwater vehicle, glider, numeric methods, mathematical model of motion, towing, excessive buoyancy.

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.

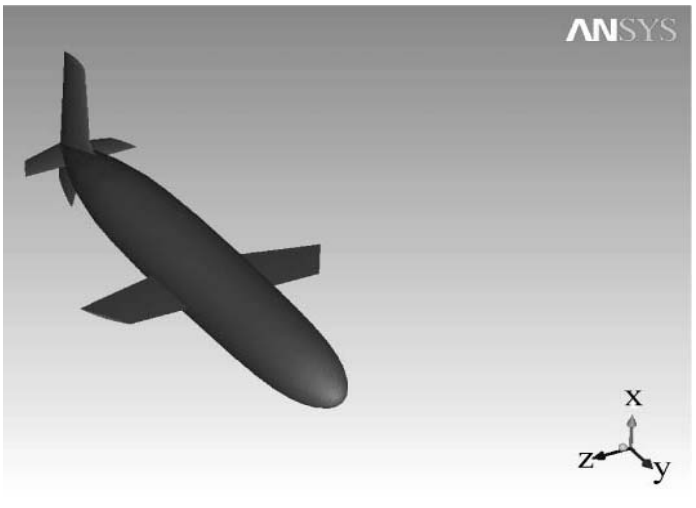


Рис.1. Трехмерная модель подводного планера.

Определение массоинерционных и гидродинамических характеристик глайдера. Подводный планер (глайдер) представляет собой объект, выполненный по самолетной схеме. Длина объекта 1167 мм, диаметр корпуса 178 мм, полное подводное водоизмещение $V = 0.022$м^3. Площадь крыльев 0.044м^3, кормового горизонтального оперения 0.014м^2. Координаты центра величины от носа $x_{цв} = 0.55$м, $y_{цв} = 0.001$ м. Момент инерции объекта $J_{0z1} = 0.167$ кг·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 глайдера 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 OX1Y1 имеют следующий вид [7, 9]:

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

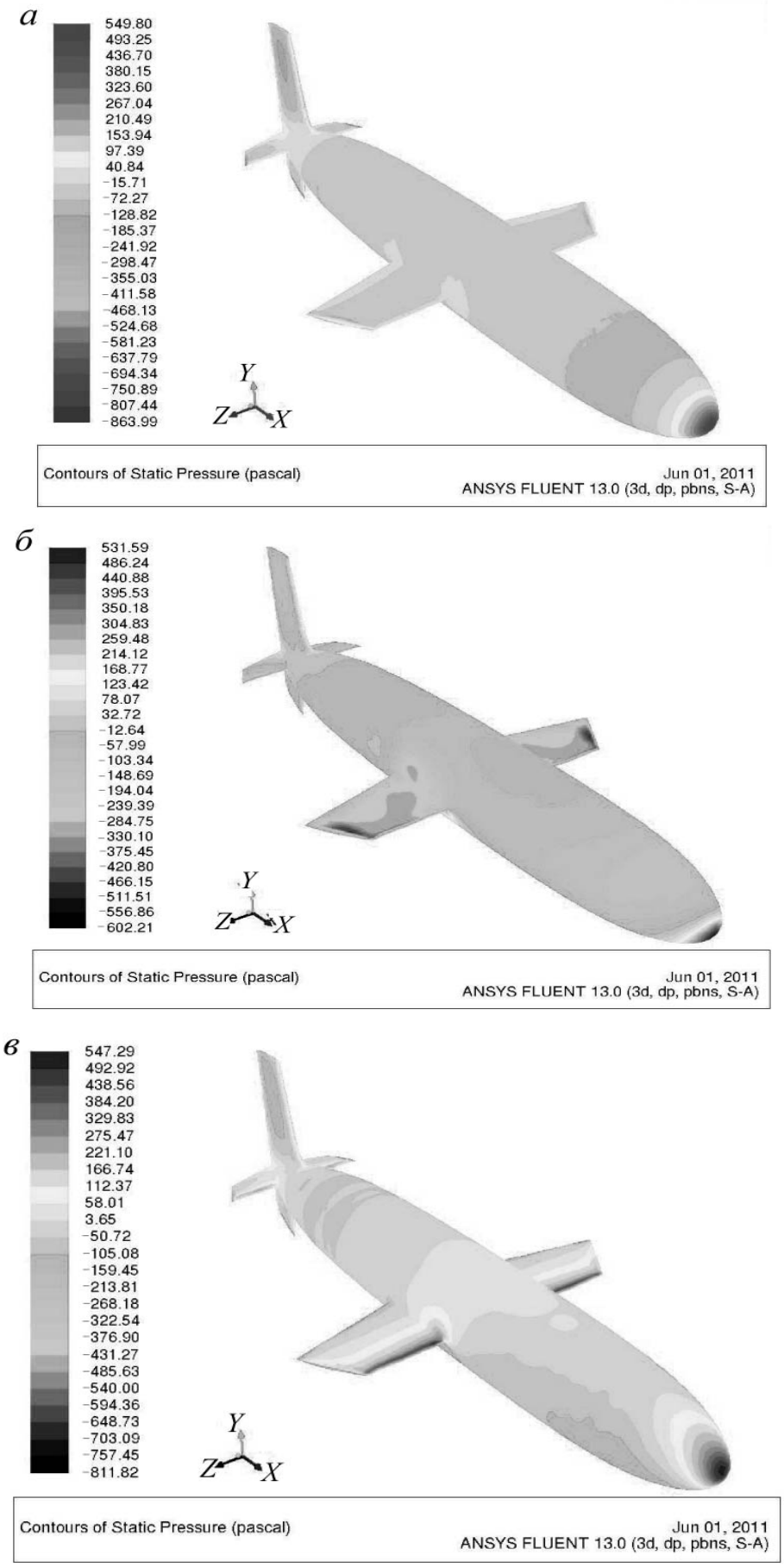


Рис.2. Распределение давления (в Па) по корпусу объекта при углах атаки: 0° (*а*), 10° (*б*) и –10° (*в*).

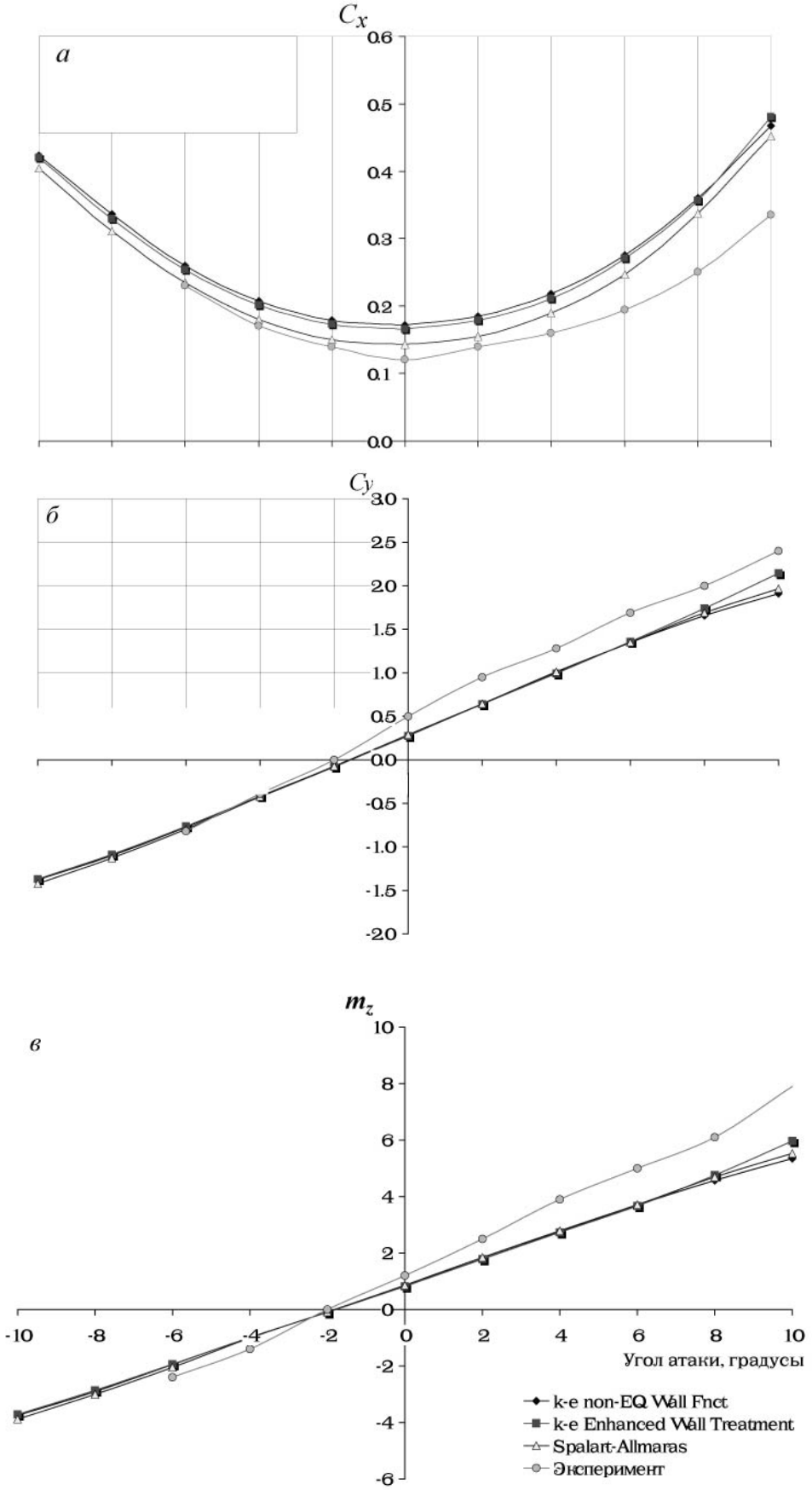


Рис.3. График изменения значений C_x (*а*), C_y (*б*) и m_z (*в*) в зависимости от угла атаки для различных моделей турбулентности в сравнении с экспериментом в поточной системе координат.

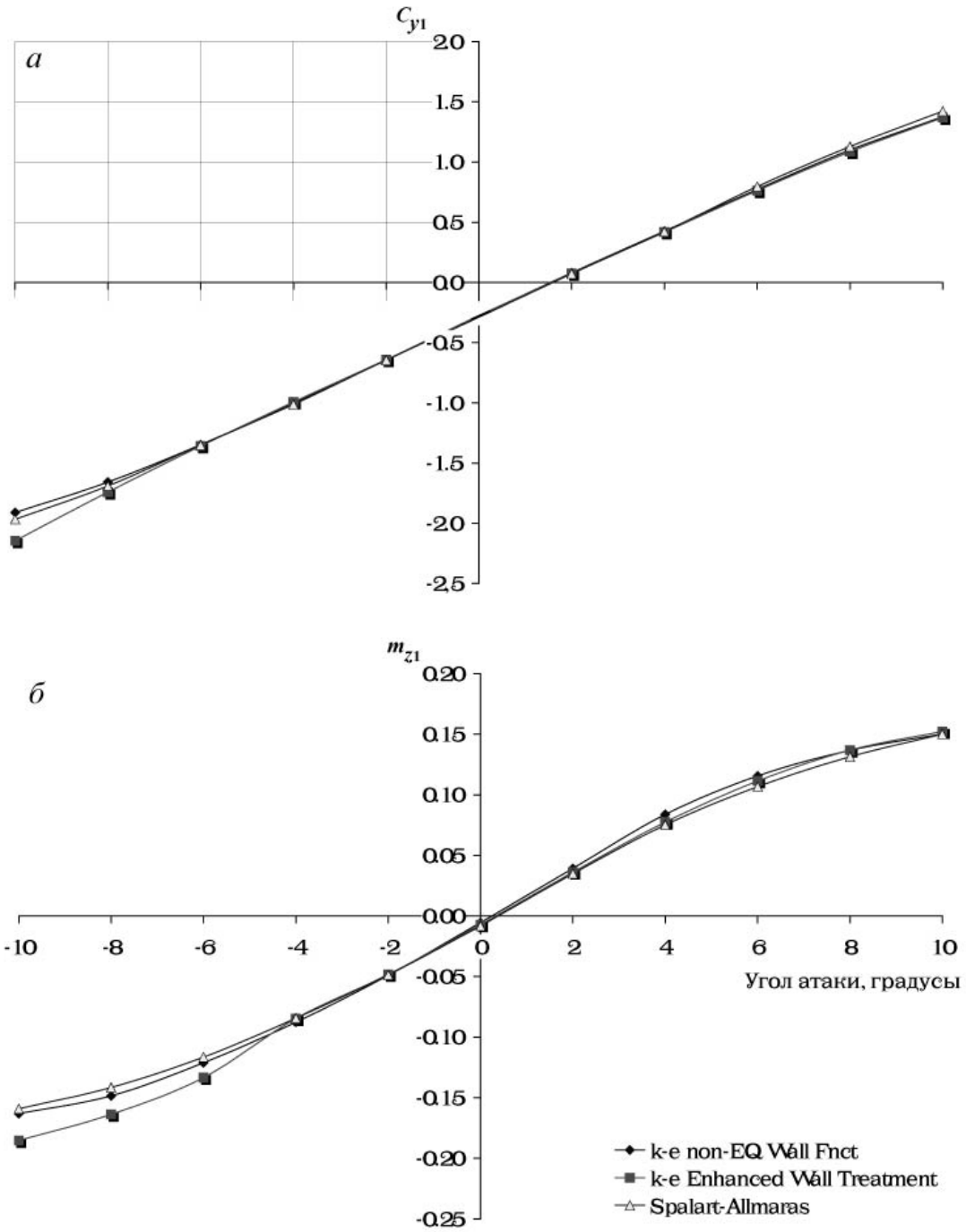


Рис.4. График изменения значений C_{y1} (*а*) и m_{z1} (*б*) в зависимости от угла атаки для различных моделей турбулентности в связанной системе координат.

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

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

Тогда значение угла атаки при установившемся движении будет равно

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

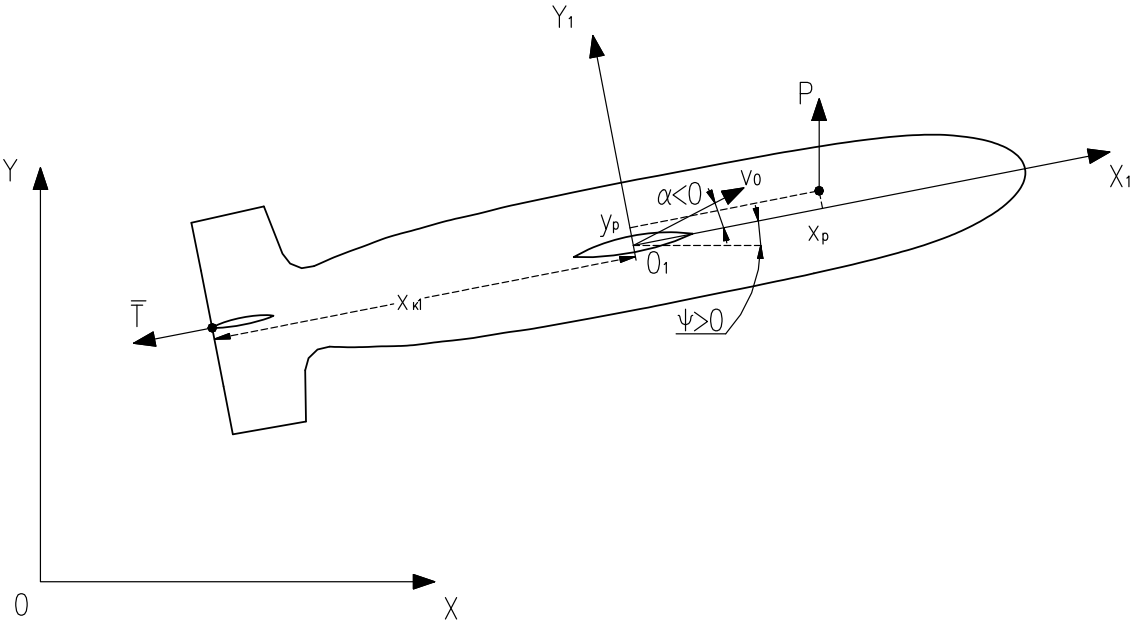


Рис.5. Используемые системы координат.

Установившееся значение угла дифферента определяется на основе соотношения

$$\mathrm{tg}\psi = \frac{c_{x1}}{c_{y1}}. \tag{5}$$

Установившееся значение скорости определяется из соотношений (2):

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

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

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 $T_x = -\widetilde{T}$. Тогда уравнения установившегося движения глайдера могут быть записаны в следующем виде:

$$c_{x1}\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3} + p\sin\psi - \widetilde{T}\cos\psi = 0;$$

$$c_{y1}\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3} + p\cos\psi + \widetilde{T}\sin\psi = 0; \qquad (8)$$

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

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

$$\sin\psi = \frac{\widetilde{T}\cos\psi - c_{x1}\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3}}{p};$$

$$\cos\psi = \frac{\frac{\widetilde{T}c_{x1}}{p}\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3} - c_{y1}\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3}}{p + \frac{\widetilde{T}^2}{p}} = c_{x1}v_0^2 f_{11}(\widetilde{T}, p) + c_{y1}v_0^2 f_{12}(\widetilde{T}, p). \qquad (9)$$

Аналогично для $\cos\psi$

$$\cos\psi = \frac{-\widetilde{T}\sin\psi - c_{y1}\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3}}{p};$$

$$\sin\psi = -\frac{\frac{\widetilde{T}c_{y1}}{p}\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3} + c_{x1}\frac{\rho_w v_0^2}{2}V^{2/3}}{p + \frac{\widetilde{T}^2}{p}} = c_{x1}v_0^2 f_{21}(\widetilde{T}, p) + c_{y1}v_0^2 f_{22}(\widetilde{T}, p). \qquad (10)$$

Приведем последнее уравнение системы (8) к следующему виду:

$$\cos\psi\left(px_p + y_{k1}\widetilde{T}\right) + \sin\psi\left(x_{k1}\widetilde{T} - py_p - \rho Vgh\right) + m_{z1}\frac{\rho_w v_0^2}{2}V = 0. \qquad (11)$$

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

$$\begin{aligned}&(c_{x1}f_{11}(\widetilde{T}, p) + c_{y1}^{\alpha}\alpha f_{12}(\widetilde{T}, p))\left(px_p + y_{k1}\widetilde{T}\right) + \\ &+ (c_{x1}f_{21}(\widetilde{T}, p) + c_{y1}^{\alpha}\alpha f_{22}(\widetilde{T}, p))(x_{k1}\widetilde{T} - py_p - \rho_w Vgh) + m_{z1}^{\alpha}\alpha\frac{\rho_w}{2}V = 0.\end{aligned} \qquad (12)$$

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

Установившееся значение угла дифферента определяется на основе соотношения

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

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

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

Результаты расчета. На рис.6–8 для глайдера с заданными характеристиками представлены параметры движения в режиме планирования. При этом значение относительной избыточной плавучести составляло $\overline{p} = \dfrac{p}{\rho_w V g} = -0.02$; 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 1м/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).

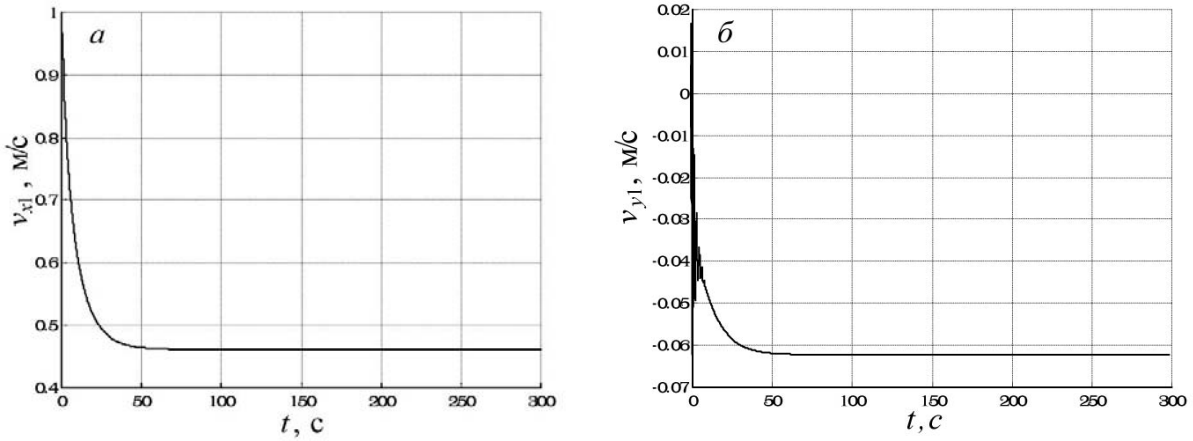


Рис.6. Зависимость продольной (*а*) и поперечной (*б*) компонент скорости глайдера от времени в связанной системе координат в режиме планирования.

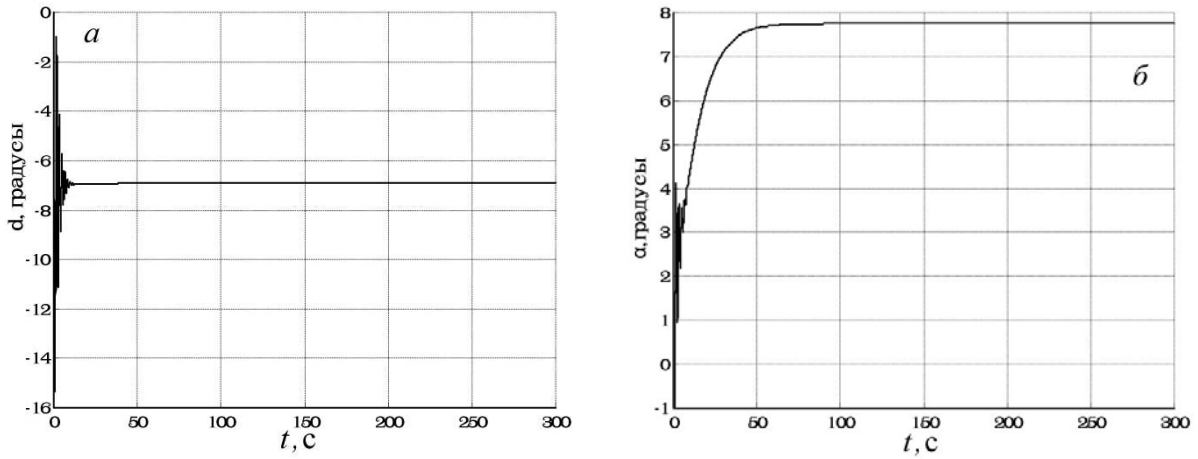


Рис.7. Зависимость дифферента (*а*) и угла атаки (*б*) глайдера от времени в режиме планирования.

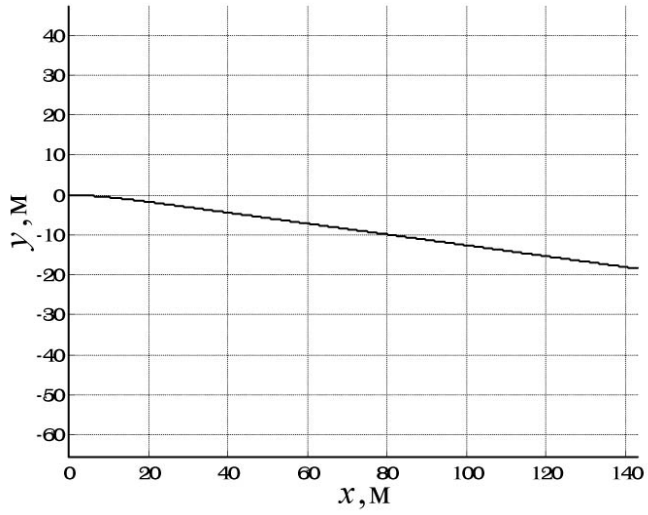


Рис.8. Траектория движения глайдера в режиме планирования.

На рис.9–11 приведены параметры движения глайдера при его работе в качестве буксировщика. При этом тяга глайдера $\widetilde{T}$ составляла 5 % величины плавучести p и соответственно 0.1 % величины $\rho_w gV$. 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 $\rho_w gV$.

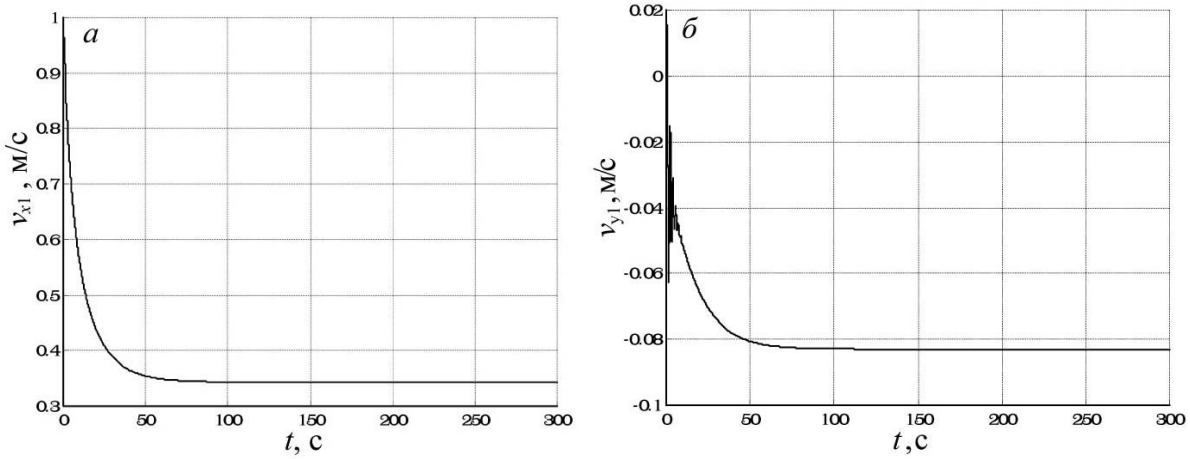


Рис.9. Зависимость продольной (*а*) и поперечной (*б*) компонент скорости глайдера от времени в связанной системе координат при его работе в качестве буксировщика.

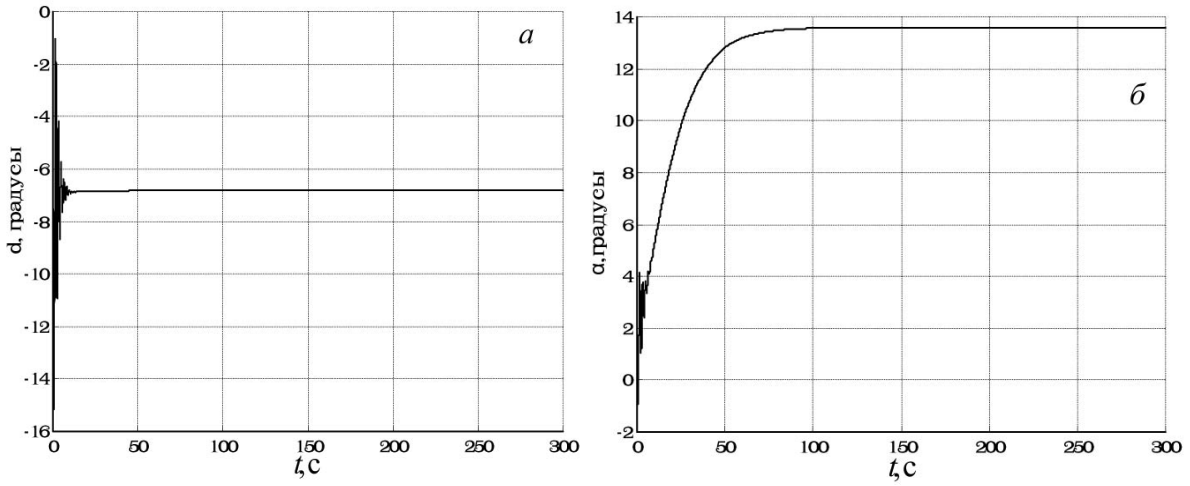


Рис.10. Зависимость дифферента (*а*) и угла атаки (*б*) глайдера от времени при его работе в качестве буксировщика.

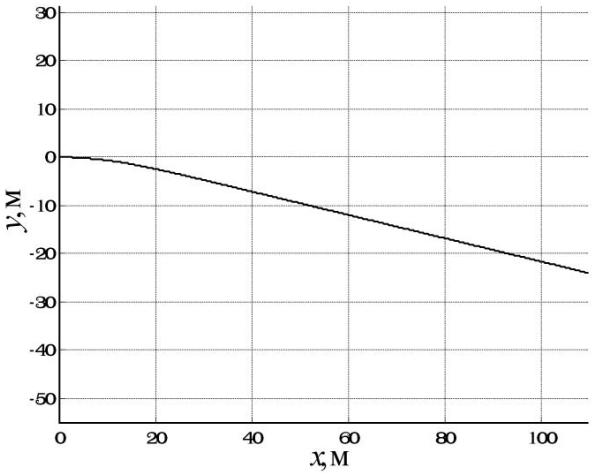


Рис.11. Траектория движения глайдера при его работе в качестве буксировщика.

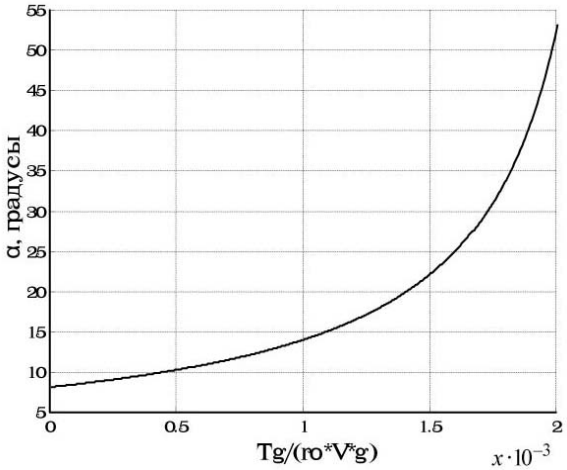
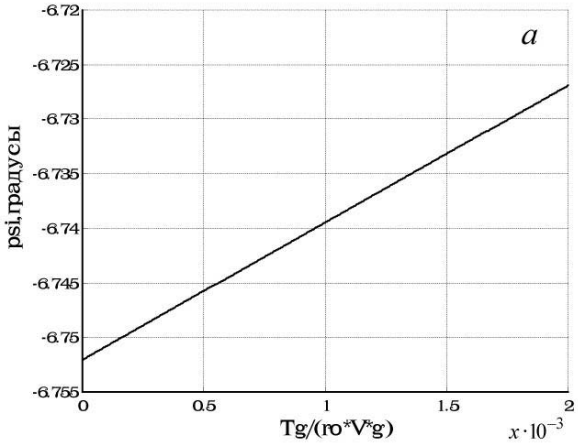


Рис.12. Изменение установившегося значения угла атаки глайдера при варьировании величиной тяги.



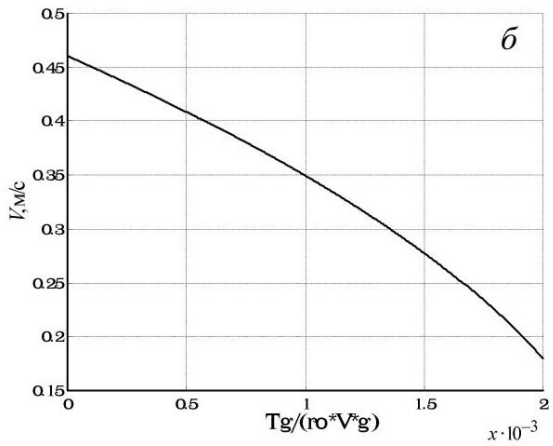


Рис.13. Изменение установившегося значения дифферента (*а*) и скорости (*б*) глайдера при варьировании величиной тяги.

Анализ зависимостей на рис.12, 13 показывает, что с увеличением тяги более 0.1 % от величины $\rho_w gV$ 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 $\rho_w gV$ 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 $\overline{p} = \dfrac{p}{\rho_w Vg} = \pm 0.02$ 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 $\rho_w gV$. Справа на этих же рисунках приведены параметры движения глайдера с увеличенными значениями знакопеременной плавучести $\overline{p} = \dfrac{p}{\rho_w Vg} = \pm 0.04$ и тяги 0.4 % величины $\rho_w gV$. 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.

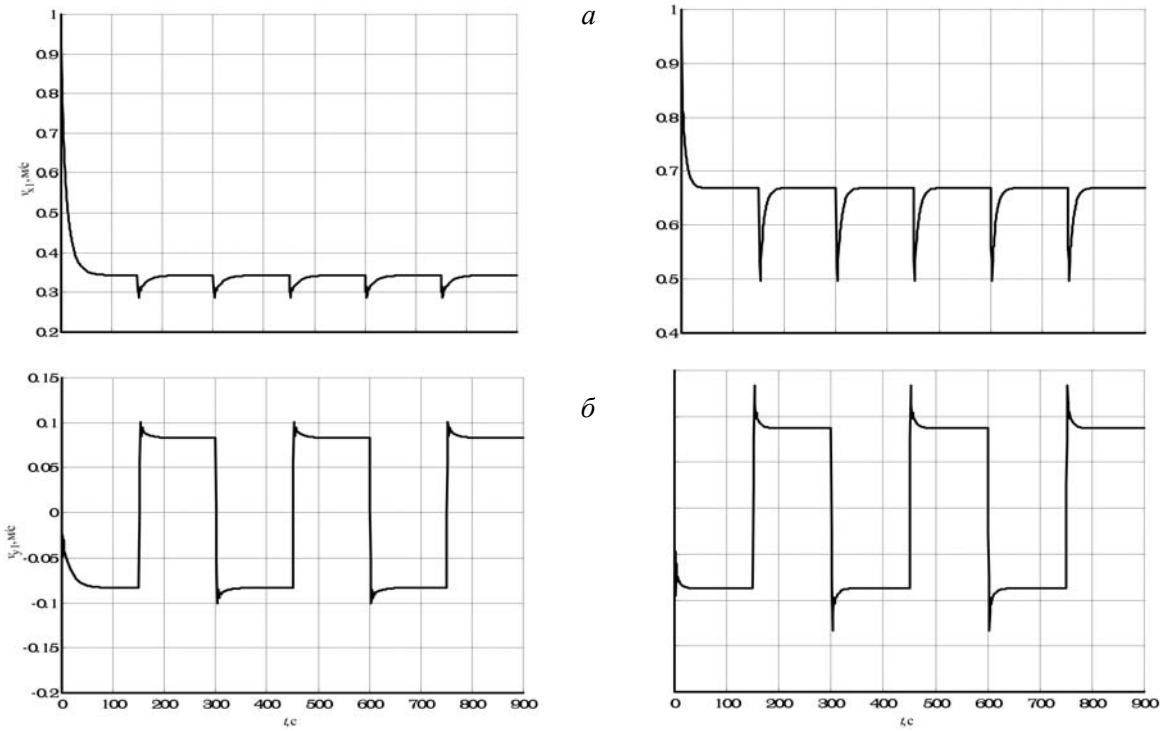


Рис.14. Зависимость продольной (*а*) поперечной (*б*) компоненты скорости глайдера от времени в связанной системе координат при задании знакомеременной плавучести.
Слева – $\overline{p} = \pm 0.02$; $\widetilde{T} = 0.001\rho_w gV$; справа – $\overline{p} = \pm 0.04$; $\widetilde{T} = 0.004\rho_w gV$.

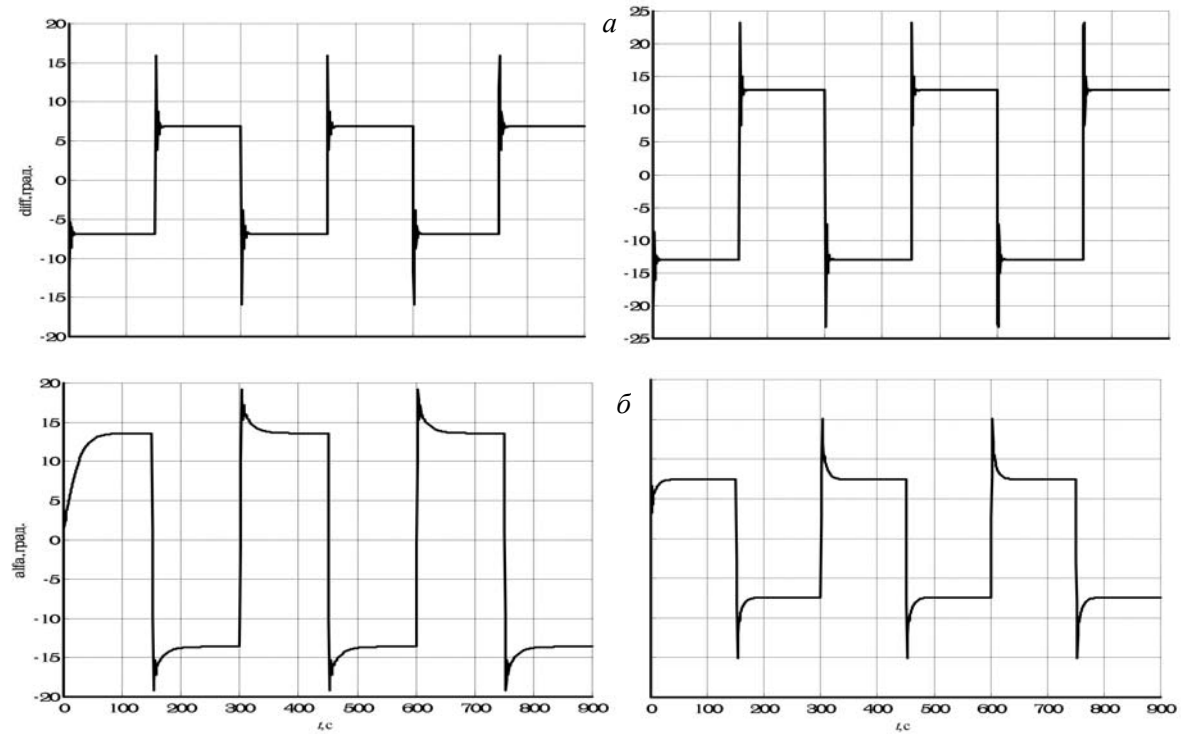


Рис.15. Зависимость дифферента (*а*) угла атаки (*б*) глайдера от времени при задании знакомеременной плавучести.
(Значения $\overline{p}$ и $\widetilde{T}$ см. рис.14).

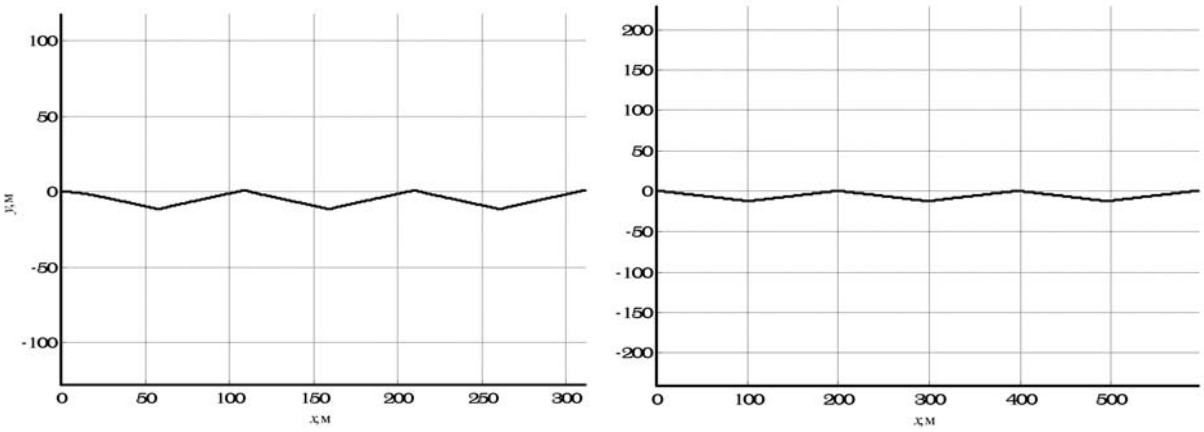


Рис.16. Траектория движения глайдера при задании знакомеременной плавучести.
(Значения $\overline{p}$ и $\widetilde{T}$ см. рис.14).

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., Крейндель 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.