

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СТАНДАРТНОГО И ГИБРИДНОГО ПОДВОДНЫХ ГЛАЙДЕРОВ

**В.В. Вельтищев, Е.А. Артемова**

В данной статье рассматриваются вопросы развития конструкции подводных глайдеров. Одним из наиболее перспективных направлений повышения их эффективности является оснащение подводных глайдеров дополнительной движительной установкой. В исследовании подробно рассмотрена конструкция глайдера, позволяющая сохранить способность гидропланирования, но избавленная от достаточно сложной системы изменения плавучести. Цель данной работы — провести количественное сравнение затрат энергии такой конструктивной схемы — инновационного гибридного аппарата и стандартного глайдера с системой изменения плавучести. Для оценки эффективности гибридного глайдера и возможных областей его использования проведен сравнительный анализ его кинематических и энергетических характеристик с аналогичными характеристиками традиционного (стандартного) глайдера. Данный анализ базируется на параметрическом моделировании динамики аппаратов. В результате исследования установлено, что гибридный подводный глайдер становится энергетически более выгодным по сравнению со стандартным при работе на больших глубинах, особенно в режимах с малой амплитудой траектории относительно глубины погружения. Отказ от сложных гидравлических систем изменения плавучести в пользу движительной установки не только упрощает конструкцию глайдера, но и обеспечивает его высокую маневренность.

**Ключевые слова:** подводный глайдер, гибридный глайдер, энергоэффективность, механизм изменения плавучести, движительная установка, гидродинамическое сопротивление, математическое моделирование.

## Введение

Разработка автономных подводных аппаратов является одним из ключевых направлений современной робототехники, особенно в контексте исследования и мониторинга морских глубин. Одним из перспективных типов автономных подводных аппаратов являются подводные глайдеры, которые сочетают в себе энергоэффективность и длительную автономность.

Традиционная архитектура данных аппаратов основана на использовании системы изменения плавучести и управления дифферентом для обеспечения поступательного движения по пилообразной траектории [1]. Основным преимуществом стандартных глайдеров является энергоэффективность, обеспечивающая автономность в течение многих месяцев работы. В то же время развитие подводной робототехники стимулирует появление гибридных глайдеров [2]. Данные аппараты объединяют в своей конструкции систему изменения плавучести с дополнитель-

ной активной движительной установкой, обычно на основе гребного винта [3]. Подводные глайдеры, такие как Slocum G2, Petrel, Haiyuan, сочетают возможности планирования по пилообразной траектории с активным маневрированием с использованием движителя, установленного вдоль продольной оси [4].

На сегодняшний день известна и более радикальная схема построения гибридных глайдеров, например, аппарат «SORA», в котором система изменения плавучести полностью отсутствует. Движение осуществляется исключительно за счет движительной установки, состоящей из двух гребных винтов [5]. Это упрощает конструкцию и повышает маневренность глайдера, но ставит вопрос об энергетической эффективности данного решения. Именно поэтому целью данной работы является проведение сравнительного количественного анализа экономичности движения стандартного глайдера и гибридного глайдера типа SORA с активной движительной установ-

кой на основе параметрического моделирования их динамики.

## 1. Концептуальные особенности объекта исследования

Как было отмечено выше, гибридный глайдер SORA не имеет системы изменения плавучести. Его конструкция основана на следующих принципах:

1. Аппарат обладает постоянной положительной плавучестью.

2. При отключенных двигателях аппарат имеет положительный дифферент. Это осуществляется за счет смещения центра объема к носу аппарата относительно центра тяжести.

3. Два гребных винта, расположенных в кормовой части, используются как для создания упора, так и для создания момента, разворачивающего аппарат на заданный угол дифферента при погружении.

4. Движение глайдера осуществляется попеременно в активном режиме за счет двигателей и в режиме гидропланирования. Изменение курса за счет работы двигателей возможно как в активном, так и в пассивном режимах движения.

Сочетание этих принципов позволяет полностью отказаться от сложных гидравлических или электрических систем изменения плавучести, а также механизмов перемещения аккумуляторных батарей для регулировки углов дифферента и крена.

## 2. Определение основных параметров и построение динамической модели стандартного глайдера

Для корректной оценки энергетической эффективности рассматриваемого гибридного глайдера представляется целесообразным сравнить его с условным стандартным глайдером. На основании данных [6] был осуществлен выбор основных конструктивных параметров условного стандартного глайдера, приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры стандартного подводного глайдера

| Параметр   | Значение |
|--|----------|
| Длина, м   | 2        |
| Диаметр, м   | 0,21     |
| Масса, кг  | 51       |
| Размах крыльев, м                                      | 1,6      |
| Максимальная скорость горизонтального перемещения, м/с | 0,4      |
| Максимальная глубина погружения, м                     | 1500     |

Внешний вид стандартного глайдера приведен на рис. 1.

Для дальнейшей оценки динамических и энергетических характеристик глайдера было проведено численное моделирование в программном пакете SolidWorks Flow Simulation.



Рис. 1. Внешний вид стандартного подводного глайдера

Для количественной оценки коэффициента гидродинамического сопротивления  $C_x$  вдоль продольной оси подводного аппарата была выполнена серия расчетов с вариацией скорости набегающего потока  $v_{\Pi}$  в диапазоне от  $10^{-5}$  до 1 м/с. Визуализация процесса гидродинамического расчета представлена на рис. 2.

Для каждого режима течения было рассчитано соответствующее число Рейнольдса по следующей формуле:

$$Re = \frac{v_{\Pi} l_{ПА}}{\nu},$$

где  $\nu = 1,78 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – коэффициент кинематической вязкости воды в глубоководных условиях;  $l_{ПА}$  – длина аппарата.

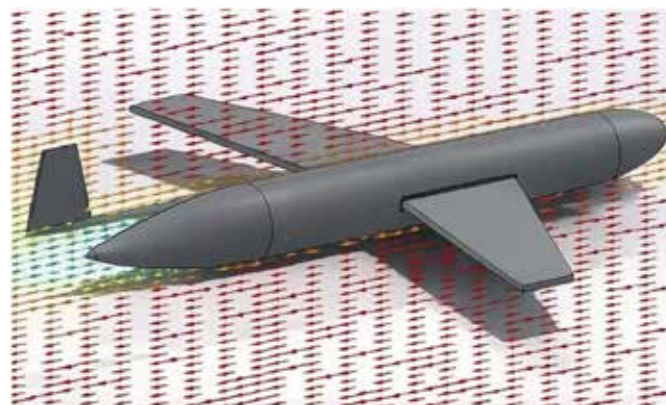


Рис. 2. Экранное представление расчета гидродинамического сопротивления аппарата вдоль продольной оси

Полученные результаты гидродинамического расчета представлены в виде графика зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления аппарата вдоль продольной оси от числа Рейнольдса

в логарифмическом масштабе. Данный график изображен на рис. 3.

Приведенный выше график наглядно демонстрирует экспоненциальный характер изменения коэффициента гидродинамического сопротивления в области малых чисел Рейнольдса, а также наличие критического числа Рейнольдса, равного  $10^5$ , соответствующего переходу к турбулентному режиму, в области которого коэффициент гидродинамического сопротивления принимает постоянное значение  $C_x = 0,82$ .

На рис. 3 показано, что коэффициент гидродинамического сопротивления обратно пропорционален скорости набегающего потока при ее малом значении.

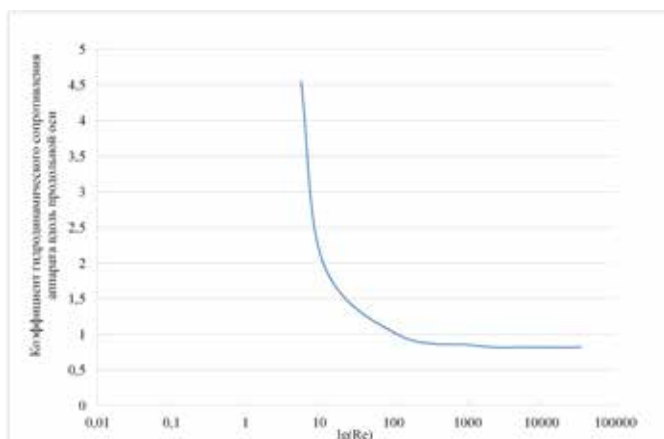


Рис. 3. График зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления вдоль продольной оси от числа Рейнольдса

Из этого следует, что гидродинамическое сопротивление вдоль продольной и поперечной осей аппарата можно рассчитать по следующей формуле:

$$F_{Гx} = -C_{vx1} v_x |v_x| - C_{vx2} v_x,$$

где  $C_{vx1}$ ,  $C_{vx2}$  – приведенные гидродинамические коэффициенты;  $v_x$  – проекция скорости аппарата на продольную ось.

Для определения коэффициентов  $C_{vx1}$ ,  $C_{vx2}$  были построены графики зависимости силы гидродинамического сопротивления вдоль продольной оси от скорости набегающего потока, приведенные на рис. 4, 5.

При аппроксимации полученных графиков полиномиальной кривой и линейной зависимостью соответственно были получены значения приведенных гидродинамических коэффициентов:  $C_{vx1} = 14,15 \text{ кг/м}$ ,  $C_{vx2} = 0,17 \text{ кг/с}$ .

Для определения коэффициента гидродинамического сопротивления подводного глайдера вдоль поперечной оси был выполнен аналогичный расчет.

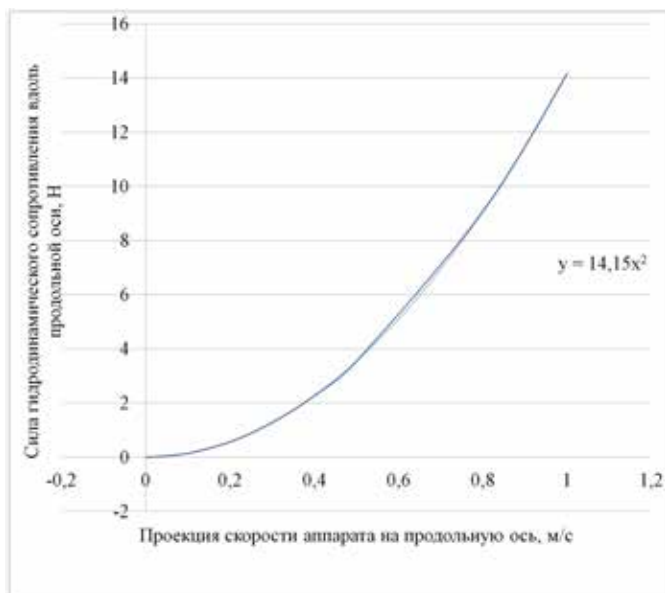


Рис. 4. График зависимости гидродинамической силы сопротивления вдоль продольной оси от проекции скорости движения аппарата на эту ось

Анализ результатов показал, что турбулентный режим обтекания устанавливается при числах Рейнольдса, превышающих критическое значение  $10^4$ . В указанном диапазоне коэффициент поперечного гидродинамического сопротивления стабилизируется, принимая постоянное значение  $C_y = 2,2$ .

Также была проведена аппроксимация полученных графиков, в результате которой приведенные гидродинамические коэффициенты вдоль поперечной оси принимают следующие значения:  $C_{vy1} = 458,2 \text{ кг/м}$ ,  $C_{vy2} = 4,6 \text{ кг/с}$ .

Следующим этапом работы являлось составление динамической модели глайдера без активной движи-

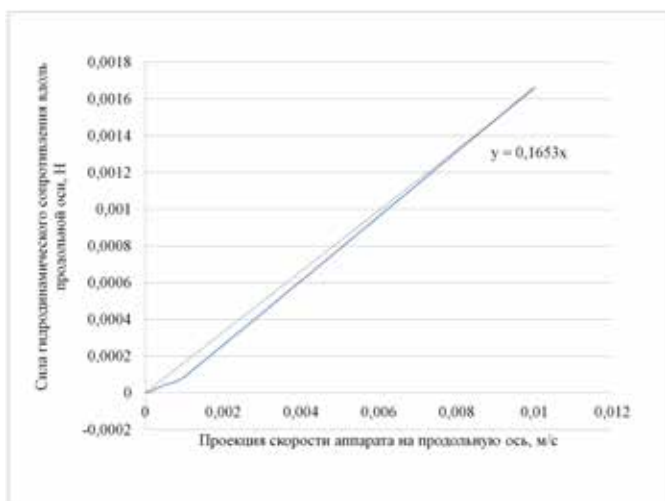


Рис. 5. График зависимости гидродинамической силы сопротивления вдоль продольной оси от проекции скорости движения аппарата на эту ось при малых скоростях

тельной установки. Стандартная математическая модель подводного глайдера приведена в источниках [7, 8]. Данная модель была упрощена и представлена для описания плоского движения в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = (W - G) \sin(\vartheta) + F_{Гx} \\ m \frac{dv_y}{dt} = (W - G) \cos(\vartheta) + F_{Гy} \end{cases}$$

где  $m$  – масса аппарата;  $v_y$  – проекция скорости аппарата на вертикальную ось;  $G$  – сила тяжести;  $W$  – сила Архимеда;  $\vartheta$  – угол дифферента.

Структурная схема динамической модели стандартного глайдера приведена на рис. 6.

Блок пересчета осуществляет преобразование проекций скорости движения подводного аппарата в связанной системе координат в скорость движения в местной географической системе координат. В основе данного блока лежит система уравнений:

$$\begin{cases} v_\xi = v_x \cos(\vartheta) + v_y \sin(\vartheta) \\ v_\eta = v_x \sin(\vartheta) + v_y \cos(\vartheta) \end{cases}$$

В ходе анализа данной модели осуществлялся подбор параметров стандартного глайдера для достижения оптимальных характеристик движения аппарата. Был построен график зависимости горизонтальной скорости аппарата от объема изменения

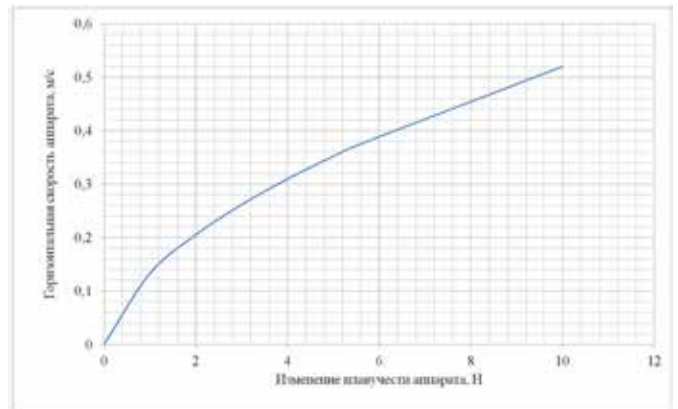


Рис. 7. График зависимости горизонтальной скорости стандартного глайдера от изменения плавучести

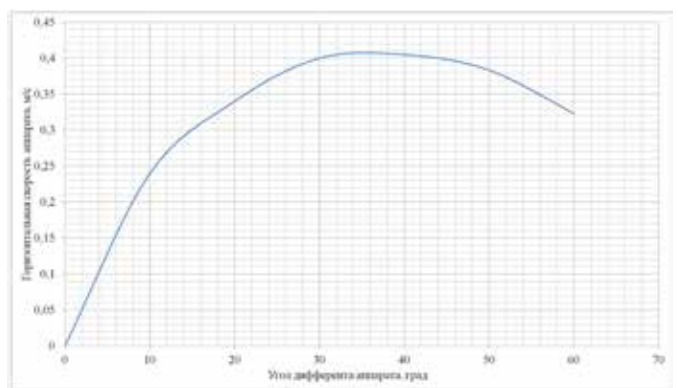
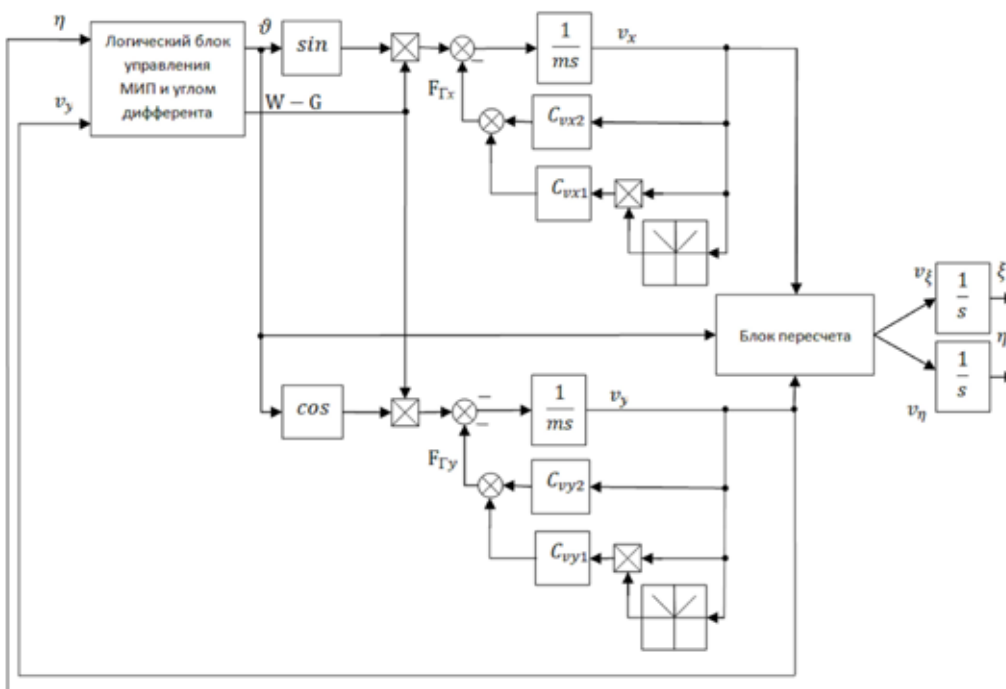


Рис. 8. График зависимости горизонтальной скорости аппарата от угла дифферента



МИП – механизм изменения плавучести

Рис. 6. Динамическая модель стандартного подводного глайдера

плавучести, приведенный на рис. 7.

Данный график показывает, что требуемая скорость горизонтального перемещения аппарата, равная 0,4 м/с, достигается при изменении плавучести, равном 6,2 Н.

Для определения угла дифферента аппарата был построен график зависимости горизонтальной скорости перемещения глайдера от угла дифферента, приведенный на рис. 8. При этом изменение плавучести аппарата было принято равным 6,2 Н.



операция выполняется с помощью движителей, создающих момент относительно центра масс аппарата. Также движители преодолевают силы Архимеда и гидродинамического сопротивления, благодаря этому подводный глайдер погружается с заданным углом дифферента. Положение аппарата и действующие на него силы при включенных движителях изображены на рис. 12.

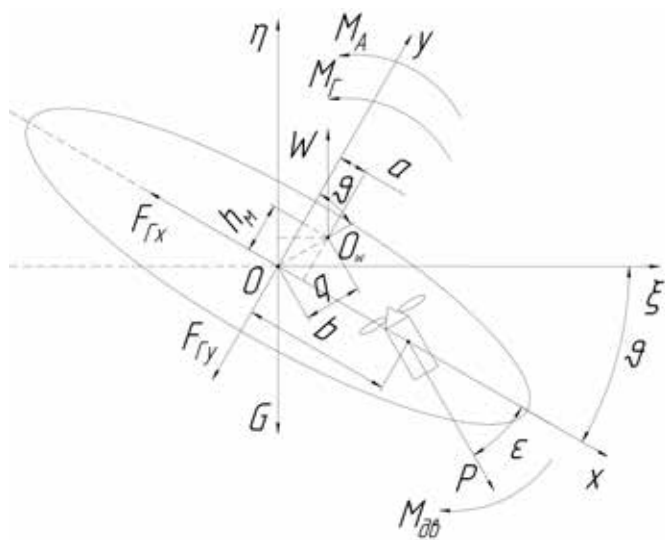


Рис. 12. Силы, действующие на аппарат, и его положение в режиме погружения

На приведенных выше рисунках введены следующие обозначения:  $h_m$  – метacentрическая высота;  $O_w$  – центр объема подводного аппарата;  $O$  – центр масс аппарата;  $Oηξ$  – местная географическая система координат полусвязанная с подводным аппаратом;  $Oxy$  – связанная с аппаратом система координат;  $ε$  – угол наклона движителей к продольной оси аппарата;  $b$  – расстояние, на котором расположены движители относительно центра масс;  $M_A$  – момент силы Архимеда относительно центра тяжести;  $M_{об}$  – момент силы тяги движителей;  $a$  – расстояние между центром объема и центром масс вдоль продольной оси;  $M_G$  – момент силы сопротивления вращению подводного аппарата.

Из приведенного выше чертежа (рис. 12) следует, что проекция упора на продольную ось подводного аппарата рассчитывается по следующей формуле:

$$P_x = F_{Гx} + (W - G) \sin(2\theta). \quad (1)$$

Сила Архимеда определяется выражением:

$$W = G + \Delta W,$$

где  $\Delta W$  – избыточная положительная плавучесть.

Затем был проведен анализ гидродинамических характеристик гибридного глайдера согласно ме-

тодологии, описанной в разделе 2. Данный расчет показал, что установка движителей на стандартный глайдер не приводит к существенным изменениям коэффициентов гидродинамического сопротивления. Исходя из этого для гибридного глайдера можно принять значения данных коэффициентов соответствующими стандартному аппарату.

Таким образом, коэффициент гидродинамического сопротивления гибридного аппарата вдоль продольной оси равен  $C_x = 0,82$ , сила гидродинамического сопротивления аппарата, движущегося со скоростью 0,4 м/с, равна  $F_{Гx} = 2,3 Н$ .

При подстановке исходных параметров аппарата в формулу (1) была рассчитана проекция суммарного упора от двух движителей на продольную ось аппарата,  $P_x = 5,4 Н$ .

Далее были определены координаты центра объема аппарата. Как видно из рис. 12, момент силы Архимеда можно представить в виде выражения:

$$M_A = W \frac{h_m}{\cos(\theta)} \sin(2\theta).$$

Момент, создаваемый движителями, рассчитывается по формуле:

$$M_{об_o} = P_x b \operatorname{tg}(\epsilon).$$

Для разворота подводного глайдера в положение, изображенное на рис. 12, необходимо, чтобы момент от движительной установки был равен следующему выражению:

$$M_{об_o} = M_A + M_G.$$

Вследствие сложности определения момента сопротивления вращению было принято решение об учете данной величины в виде коэффициента запаса упора движительной установки, равного  $k = 1,5$ . Тогда справедлива нижеприведенная формула:

$$M_{об_o} = k P_x b \operatorname{tg}(\epsilon) = W \frac{h_m}{\cos \theta} \sin(2\theta).$$

Из полученных выражений следует, что метacentрическая высота подводного аппарата рассчитывается по формуле:

$$h_m = \frac{k P_x b \operatorname{tg}(\epsilon) \cos(\theta)}{W \sin(2\theta)} = \frac{k P_x b \operatorname{tg}(\epsilon)}{2 W \sin(\theta)}$$

При подстановке начальных параметров, приведенных в табл. 2, было получено значение метacentрической высоты, равное 0,009 м.

Расстояние между центром объема и центром масс вдоль продольной оси аппарата было определено в виде:

$$a = h_m \operatorname{tg} \theta = 0,005 \text{ м.}$$

Исходя из рис. 12 упор одного движителя вдоль его оси определяется выражением:

$$P_1 = \frac{kP_x}{2\cos(\varepsilon)} = 4,7H.$$

Суммарный упор движителей рассчитывается по следующей формуле:

$$P_\Sigma = 2P_1 = 9,4 H.$$

В результате проведенных вычислений были получены недостающие параметры гибридного глайдера.

Для определения динамических характеристик данного аппарата была составлена динамическая модель. Уравнения, описывающие модель, соответствуют следующей системе:

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = P_\Sigma \cos(\varepsilon) + (W - G) \sin(\vartheta) + F_{Гx} \\ m \frac{dv_y}{dt} = -P_\Sigma \sin(\varepsilon) + (W - G) \cos(\vartheta) + F_{Гy}, \\ \vartheta = \vartheta_0 - P_\Sigma b \sin(\varepsilon) W_{диф}(s) \end{cases} \quad (2)$$

где  $\vartheta_0$  – дифферент аппарата при выключенных движителях;

$W_{диф}(s) = \frac{1}{0,5s + 1}$  – передаточная функция, описывающая динамику изменения угла дифферента.

Исходя из рассчитанных значений и системы уравнений (2) была составлена структурная схема динамической модели гибридного глайдера, изображенная на рис. 13.

В результате моделирования были получены графики зависимости горизонтальной скорости глайдера от времени и траектория движения аппарата на активном и пассивном участках, приведенные на рис. 14, 15. Траектория движения гибридного глайдера при пассивном всплытии в режиме гидропланирования аналогична траектории стандартного аппарата, приведенной на рис. 9.

Из рис. 14 следует: горизонтальная скорость движения аппарата равна 0,4 м/с, что соответствуют заданным в табл. 2 значениям.

Как показано на рис. 15, угол глиссады при погружении равен  $\beta \approx 30^\circ$  и совпадает с углом дифферента аппарата.

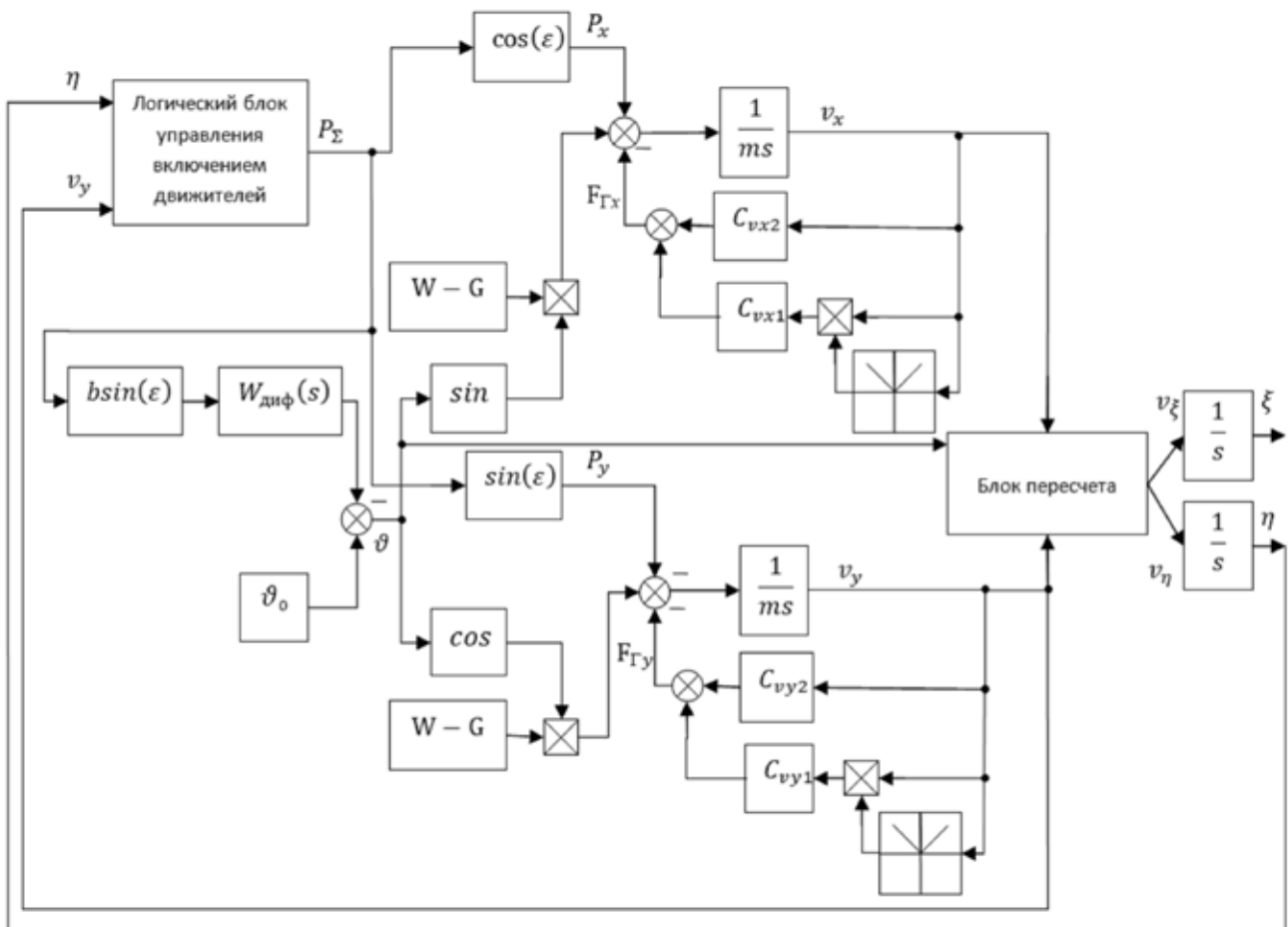


Рис. 13. Динамическая модель гибридного подводного глайдера

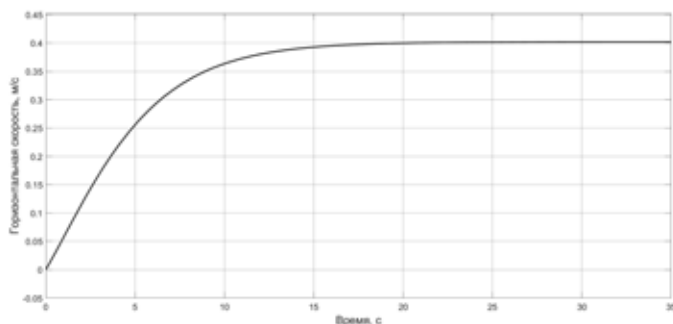


Рис. 14. График зависимости скорости вдоль продольной оси глайдера от времени

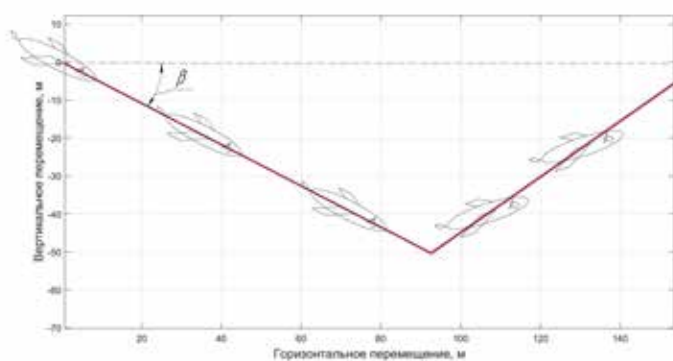


Рис. 15. Траектория движения гибридного подводного глайдера

#### 4. Анализ энергоэффективности стандартного и гибридного глайдеров

На основании проведенных расчетов и моделирования в разделах 2 и 3 можно провести анализ энергоэффективности стандартного и гибридного глайдеров.

Затраты энергии гибридного глайдера на одно погружение рассчитываются по следующей формуле:

$$W_1 = \frac{P_{\Sigma} A}{\sin(\vartheta)},$$

где  $A$  – амплитуда траектории движения аппарата. Всплытие гибридного глайдера осуществляется в режиме гидропланирования без затрат энергии.

Затраты энергии стандартного глайдера на одно погружение–всплытие определяются выражением:

$$W_2 = \rho g h_m \Delta V,$$

где  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды;  $g = 10 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $h_m$  – максимальная глубина погружения аппарата;  $\Delta V = 0,00062 \text{ м}^3$  – увеличение объема системы изменения плавучести. Примем, что затраты энергии на уменьшение плавучести пренебрежимо малы.

При этом расстояния, пройденные аппаратами в горизонтальном направлении, определяются следующими зависимостями для гибридного и стандартного глайдеров соответственно:

$$x_1 = \frac{A}{\tan \alpha} + \frac{A}{\tan \beta}, \quad x_2 = \frac{2A}{\tan \alpha}.$$

Тогда удельные затраты энергии на один метр горизонтального перемещения стандартного и гибридного глайдеров определяются следующими выражениями:

$$\Delta W_1 = \frac{P_{\Sigma} A}{x_1 \sin(\vartheta)} = \frac{P_{\Sigma}}{\sin(\vartheta) \left( \frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right)},$$

$$\Delta W_2 = \frac{\rho g h_m \Delta V \tan \alpha}{2A}.$$

Приведенные выше формулы показывают, что удельные затраты энергии гибридного глайдера не зависят от глубины погружения аппарата и амплитуды траектории движения. Однако для стандартного глайдера удельные затраты энергии зависят от максимальной глубины погружения, а также амплитуды траектории.

Результаты расчетов затрат энергии гибридного и стандартного подводных глайдеров при различных глубинах погружения и амплитудах траектории движения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Затраты энергии аппарата на одно погружение–всплытие

| Тип аппарата | Максимальная глубина погружения, м | Амплитуда траектории, м | Удельные затраты энергии на горизонтальное перемещение, Дж/м |
|--------------|------------------------------------|-------------------------|--|
| Гибридный    | 5...500                            | 5...500                 | 5,9  |
| Стандартный  | 5                                  | A=h <sub>m</sub>        | 2,1  |
|              | 10                                 |                         |  |
|              | 50                                 |                         |  |
|              | 100                                |                         |  |
|              | 200                                |                         |  |
|              | 300                                |                         |  |
|              | 400                                |                         |  |
|              | 500                                |                         |  |
|              | 500                                | 5                       | 212,7  |
|              |                                    | 10                      | 106,3  |
| 50           |                                    | 21,3                    |  |
| 100          |                                    | 10,6                    |  |
| 200          |                                    | 5,3                     |  |
| 300          |                                    | 3,5                     |  |
| 400          | 2,7                                |                         |  |

Анализ данных показывает, что затраты энергии стандартного глайдера значительно возрастают при работе на больших глубинах с малой амплитудой траектории. Данный эффект возникает из-за существенных затрат энергии на увеличение плавучести глайдера против внешнего давления.

Для более наглядного представления табл. 3 была построена граница применимости, разделяющая области энергетической эффективности двух схем. Данный график приведен на рис. 16. Установлено, что гибридный глайдер SORA более экономичен при амплитудах пилообразной траектории, меньших одной трети глубины погружения.

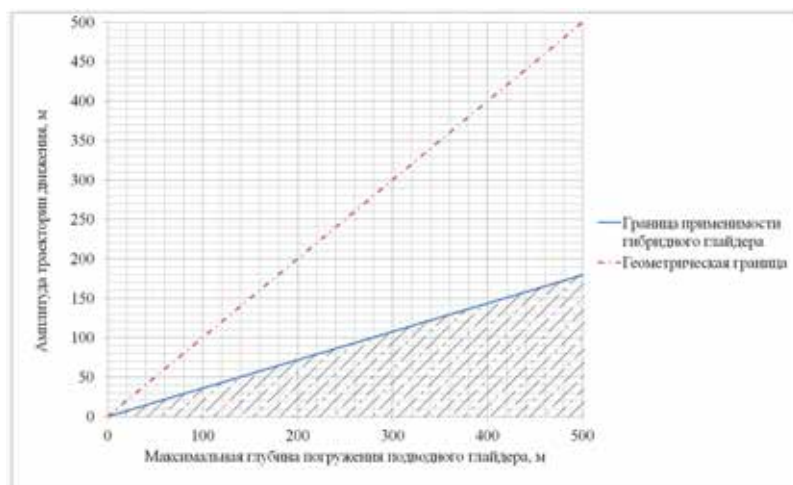


Рис. 16. Граница применимости гибридного глайдера

## Заключение

В ходе выполненного исследования проведен сравнительный количественный анализ энергоэффективности двух принципиально различных схем построения подводных глайдеров: стандартного аппарата с механизмом изменения плавучести и гибридного аппарата типа SORA, в котором движение и управление дифферентом осуществляются исключительно за счет движительной установки, без использования системы изменения плавучести и управления дифферентом. На основе гидродинамических расчетов и параметрического моделирования динамики получены численные оценки энергетических затрат обоих аппаратов при варьировании глубины выполняемой миссии и амплитуды траектории.

Результаты энергетического анализа показали, что затраты энергии гибридного глайдера определяются только амплитудой его перемещения и не зависят от абсолютной глубины погружения. В то же время для стандартного глайдера увеличение рабочей глубины приводит к резкому росту энергопотребления, что обусловлено необходимостью совершения работы против внешнего давления при изменении объема гидравлической системы. Также установлено существование границы, разделяющей области энергетически эффективного применения рассматриваемых схем: при работе на значительных глубинах и малой

амплитуде траектории относительно глубины погружения концепция SORA демонстрирует более высокую энергетическую эффективность по сравнению с классической. Полученные данные свидетельствуют о том, что рассматриваемый гибридный глайдер может эффективно использоваться в тех случаях, когда выход на поверхность не требуется или невозможен, например, для изучения подледных областей океана на значительных глубинах. Эти результаты подтверждают перспективность использования гибридных глайдеров без систем изменения плавучести и управления дифферентом для глубоководного мониторинга в условиях, где ключевое значение имеет маневренность.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гой В.А., Костенко В.В. Регулирование плавучести и дифферента автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. 2016. №1 (21). С. 4–14.
2. Маевский А.М., Гайкович Б.А. Разработка гибридных автономных необитаемых аппаратов для исследования месторождений углеводородов // Вести газовой науки. 2019. № 2 (39). С. 29–40.
3. Матвиенко Ю.В., Кузькин В.М., Костенко В.В., Пересельков С.А., Хворостов Ю.А., Грачев В.И., Ладькин Н.В. Гибридный автономный необитаемый подводный аппарат освещения подводной обстановки мелководных акваторий // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2025. Т. 17, № 1. С. 125–132. DOI: 10.17725/rensit.2025.17.125.
4. Овдиенков И. Н., Чуксин Я.Н. Автономные подводные глайдеры: Аналитический отчет. СПб.: ЦКБ МТ «Рубин», 2018. Т. 1. 297 с.
5. Пат. 5504499 В2 Япония, МПК В63С11/00, В63С11/48, В63Г8/08, В63Г8/18, В63J99/00. Solar underwater glider and submerging method thereof / заявитель и патентообладатель: Университет префектуры Осака. № 2010101991; заявл. 27.04.2010; опубл. 28.05.2014. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/045320404/publication/JP5504499B2> (дата обращения: 10.03.2026).
6. Селезнев И.А., Ясников А.И. Перспективы применения подводных глайдеров для океанографии и освещения подводной обстановки: Обзор по материалам зарубежной печати // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 1 (43). С. 4–13. DOI: 10.37102/1992-4429\_2023\_43\_01\_01. EDN: HPVCMN.
7. Gurenko B., Maevskiy A., Kulchenko A. The structure of automatic control systems for underwater gliders // Proceedings of the 4th International conference on control, mechatronics and automation (ICCSMA '16). New York, USA: ACM, 2016. С. 88–91. DOI: <https://dl.acm.org/doi/epdf/10.1145/3029610.3029640>.
8. Сухоруков А.Л., Титов М.А. Об использовании эффекта планирования для движения подводных аппаратов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. № 4. С. 88–101.

## Справка об авторах

**ВЕЛЬТИЩЕВ Вадим Викторович**, заведующий кафедрой «Подводные роботы и аппараты», д.т.н., доцент  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Адрес: 105005 г. Москва, 2-я Бауманская д. 5.

**Область научных интересов:** подводные исполнительные системы и общие вопросы проектирования подводных робототехнических комплексов.

**E-mail:** vvv@bmstu.ru

**АРТЕМОВА Елизавета Алексеевна**, магистрант кафедры «Подводные роботы и аппараты», инженер Инжинирингового центра «Подводная робототехника»

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Адрес: 105005 г. Москва, 2-я Бауманская д. 5.

**Область научных интересов:** встраиваемые системы, математическое моделирование подводных систем.

**E-mail:** aea21m214@student.bmstu.ru



# COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF STANDARD AND HYBRID UNDERWATER GLIDERS

V.V. Veltishchev, E.A. Artemova

This article discusses the development of the design of underwater gliders. One of the most promising ways to increase their efficiency is to equip underwater gliders with an additional propulsion system. The research discusses in detail the design of the glider, which allows to preserve the ability of hydroplaning, but freed from a rather complex system of changing buoyancy. The purpose of this work is to conduct a quantitative comparison of the energy costs of such a constructive scheme — an innovative hybrid vehicle and a standard glider with a buoyancy control system. To assess the effectiveness of the hybrid glider and possible areas of its use, a comparative analysis of its kinematic and energy characteristics was carried out in comparison with similar characteristics of a traditional (standard) glider. This analysis is based on parametric modeling of vehicle dynamics. As a result of the research, it was found that a hybrid underwater glider becomes energetically more profitable than a standard one when operating at great depths, especially in modes with a small trajectory amplitude relative to the depth of immersion. The abandonment of complex hydraulic systems for changing buoyancy in favor of a propulsion system not only simplifies the design of the glider, but also ensures its high maneuverability.

**Key words:** underwater glider, hybrid glider, energy efficiency, mechanism of change of buoyancy, propulsion system, hydrodynamic resistance, mathematical modeling.

## References

1. Goy V.A., Kostenko V.V. Buoyancy and trim control of autonomous underwater robots. *Underwater investigations and robotics*. 2016. No. 1 (21). P. 4–14.
2. Mayevskiy A.M., Gaykovich B.A. Development of hybrid autonomous uninhabited vehicles for the exploration of hydrocarbon deposits // Scientific and technical collection “Vesti gazovoy nauki”. 2019. No. 2 (39). P. 29–40.
3. Matviyenko YU.V., Kuz'kin V.M., Kostenko V.V., Perekhov S.A., Khvorostov YU.A., Grachev V.I., Ladykin N.V. Hybrid autonomous uninhabited underwater vehicle for underwater lighting in shallow waters. // *RENSIT: Radioelektronika. Nanosistemy. Informativnyye tekhnologii*. 2025. V. 17, No. 1. P. 125–132. DOI: 10.17725/rensit.2025.17.125.
4. Ovdienkov I. N., Chuksin YA.N. Autonomous underwater gliders // Analytical report SPb.: Izdatel'stvo AO «TSKB MT «Rubin», 2018. V. 1. 297 p.
5. Pat. 5504499 B2 Japan, IPC B63C11/00, B63C11/48, B63G8/08, B63G8/18, B63J99/00. Solar underwater glider and submerging method thereof / applicant and patentee: Osaka Prefecture University. — No. 2010101991; appl. 27.04.2010; publ. 28.05.2014. — URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/045320404/publication/JP5504499B2> (accessed: 10.03.2026).
6. Seleznev I.A., Iasnikov A.I. Prospects of using underwater glider for oceanography and underwater environment surveillance. Review of foreign press. *Underwater investigations and robotics*. 2023. No. 1 (43). P. 4–13. DOI: 10.37102/1992-4429\_2023\_43\_01\_01. EDN: HPVCMN.
7. Gurenko B. The structure of automatic control systems for underwater gliders / B. Gurenko, A. Maevskiy, A. Kulchenko et al. // *Proceedings of the 4th International conference on control, mechatronics and auto-*

*mation (ICCMA '16)*, New York. – NY, USA: ACM, 2016. C. 88–91. DOI: <https://dl.acm.org/doi/epdf/10.1145/3029610.3029640>.

8. Sukhorukov A.L., Titov M.A. On application of gliding effect for motion of submersible vehicles // *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. 2012. No. 4. P. 88–101.

## Information about the authors

**VELTISHCHEV Vadim Viktorovich**, head of the department of “Underwater robots and vehicles”, doctor of technical sciences, associate professor

Bauman Moscow State Technical University

**Address:** 105005 Moscow, 2nd Baumanskaya Street, 5.

**Research interests:** underwater executive systems and general design issues of underwater robotic complexes

**E-mail:** vvv@bmstu.ru

**ARTEMOVA Elizaveta Alekseevna**, master's student of the department “Underwater robots and vehicles”, engineer of the Engineering Center “Underwater Robotics”

Bauman Moscow State Technical University

**Address:** 105005 Moscow, 2nd Baumanskaya Street, 5.

**Research interests:** embedded systems, mathematical modeling of underwater systems.

**E-mail:** aea21m214@student.bmstu.ru