

## Численное моделирование управляемого движения дискообразного глайдера в стратифицированной жидкости

Коваль К.А, Сухоруков А.Л.

АО «ЦКБ МТ «Рубин», Санкт-Петербург

Одной из важнейших сфер применения современных средств робототехники является сбор актуальной информации о состоянии морской среды в режиме реального времени. Для этих целей активно используются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), среди которых можно выделить глайдеры, способные перемещаться за счет многократного изменения избыточной плавучести. Преимуществами использования глайдеров являются энергетическая эффективность и низкое акустическое излучение.

При выполнении ряда задач может быть целесообразным применение глайдеров дискообразной формы [1] (рисунок 1). Такие АНПА способны одинаково маневрировать в любом направлении, благодаря чему становится возможным сложное маневрирование, недоступное при использовании глайдера классической компоновки (рисунок 2).



Рисунок 1 – Глайдер дискообразной формы



Рисунок 2 – Глайдер классической компоновки

Система погружения-всплытия дискообразного глайдера (рисунок 3), за счет которой он совершает маневрирование, состоит из четырех гидроцилиндров, способных принимать или удалять забортную воду, тем самым изменяется значение равнодействующей силы избыточной плавучести и точка ее приложения.

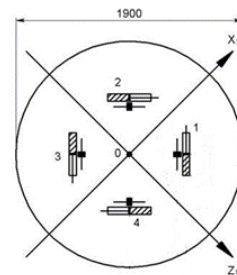


Рисунок 3 – Общий вид и схема системы управления движением глайдера

Наиболее простым и характерным для дискообразного глайдера является маневрирование в вертикальной плоскости. С учетом того, что реальные акватории, как правило, характеризуются пространственной неоднородностью среды по глубине, введем простейшую модель стратификации – резкий скачок плотности:

$$\rho_w(y) = \begin{cases} \rho_1, & y > y_{\Delta\rho}; \\ \rho_1 + \Delta\rho, & y \leq y_{\Delta\rho}. \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho_1$  – плотность верхнего слоя жидкости;  $\rho_2 = \rho_1 + \Delta\rho$  – плотность нижнего слоя;  $y_{\Delta\rho}$  – вертикальная координата скачка плотности в неподвижной системе координат, начало которой совпадает с положением геометрического центра АНПА в начальный момент времени.

Таким образом, можно записать уравнения движения рассматриваемого АНПА [2, 3]:

$$\begin{aligned}
m(1+k_{11})\frac{dv_{x1}}{dt} &= c_{x1}(\alpha)\frac{\rho_w(y)v_0^2}{2}V^{\frac{2}{3}} + m(1+k_{22})v_{y1}\omega_{z1} + p\sin\psi + [\rho_w(y) - \rho_1] \cdot gV\sin\psi; \\
m(1+k_{22})\frac{dv_{y1}}{dt} &= c_{y1}(\alpha)\frac{\rho_w(y)v_0^2}{2}V^{\frac{2}{3}} + c_{y1}^{\omega_{z1}}\frac{\rho_w(y)v_0}{2}\omega_{z1}V - m(1+k_{11})v_{x1}\omega_{z1} + \\
&+ p\cos\psi + [\rho_w(y) - \rho_1] \cdot gV\cos\psi; \\
J_{0z1}(1+k_{66})\frac{d\omega_{z1}}{dt} &= m_{z1}(\alpha)\frac{\rho_w(y)v_0^2}{2}V + m_{z1}^{\omega_{z1}}\frac{\rho_w(y)v_0}{2}\omega_{z1}V^{\frac{4}{3}} - \rho_w(y)Vgh\sin\psi + \\
&+ (x_p\cos\psi - y_p\sin\psi) \cdot p;
\end{aligned}
\tag{2}$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \omega_{z1}; \quad \alpha = -\arctg\frac{v_{y1}}{v_{x1}};$$

где  $m$  – масса АНПА;  $k_{11}, k_{22}, k_{66}$  – коэффициенты присоединенных масс корпуса АНПА;  $v_0$  – абсолютное значение величины скорости АНПА;  $v_{x1}, v_{y1}$  – проекции вектора скорости на оси связанной с АНПА системы координат;  $\omega_{z1}$  – угловая скорость вращения глайдера;  $\alpha, \psi$  – углы атаки и дифферента соответственно;  $V$  – водоизмещение глайдера;  $p$  – значение равнодействующей силы избыточной плавучести;  $x_p, y_p$  – плечи равнодействующей силы избыточной плавучести.

Позиционные ( $c_{x1}, c_{y1}, m_{z1}$ ) и вращательные ( $m_{z1}^{\omega_{z1}}$ ) гидродинамические характеристики (ГДХ) глайдера рассчитывались на основе результатов вычислительного эксперимента. Силы и моменты, действующие на корпус АНПА со стороны потока, вычислялись при помощи численного интегрирования уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, с использованием модели турбулентности  $k-\omega$  SST.

На основе решения системы уравнений (2) можно провести моделирование погружения глайдера в однородной жидкости и при наличии пикноклина ( $\Delta\rho = 5 \text{ кг/м}^3$ ). На рисунке 4 представлены траектории АНПА для обоих случаев. Можно отметить, что наличие скачка серьезно влияет на параметры движения, вплоть до невозможности совершить погружение имеющимися средствами управления плавучестью.

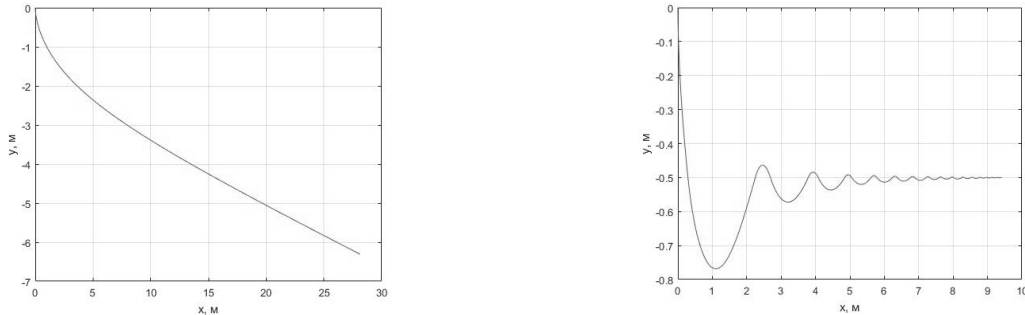


Рисунок 4 – Траектория дискообразного глайдера при погружении в однородной жидкости (слева) и при наличии скачка плотности  $\Delta\rho = 5 \text{ кг/м}^3$  (справа)

Значительный интерес представляет перемещение глайдера в заданном диапазоне глубин. Для реализации такого режима необходимо построить систему управления, позволяющую поочередно достигать целевой глубины  $\eta_0$  и основанную на управлении производительностью насосов, заполняющих и осушающих гидроцилиндры:

$$\begin{aligned}
\sigma &= A \cdot (\eta_0 - \eta) + B \cdot \int_0^t (\eta_0 - \eta) d\tau + C \cdot \dot{\eta} - p; \\
\dot{p} = f(\sigma) &= \begin{cases} 0, & |\sigma| \leq 1; \\ a \cdot (|\sigma| - 1) \cdot \text{sign}(\sigma), & 1 < |\sigma| < 2.5; \\ b \cdot \text{sign}(\sigma), & |\sigma| \geq 2.5. \end{cases}
\end{aligned}
\tag{3}$$

Оптимальные значения коэффициентов  $A, B$  и  $C$  могут быть либо вычислены, либо подобраны эмпирическим путем. Помимо представленного пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора управление движением может быть организовано при помощи адаптивного регулятора, который способен подстраиваться под случайные возмущения [4]. Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  зависят от технических характеристик конкретных насосов, используемых в конструкции АНПА. На рисунке 5 показана траектория

дискообразного глайдера при движении в диапазоне глубин от 2 до 5 м, а также соответствующая зависимость плавучести  $p$  от времени  $t$ .

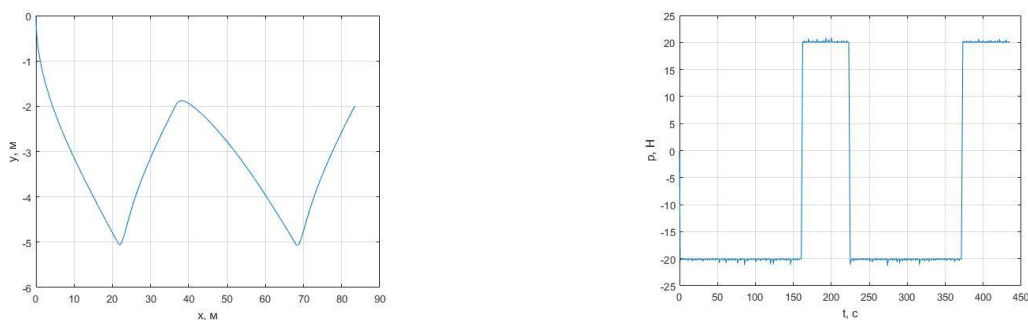


Рисунок 5 – Траектория глайдера и изменение плавучести

Не менее важным при моделировании движения в стратифицированной среде является учет изменения ГДХ подводного объекта при прохождении пикноклина [5]. Эта задача может быть решена при использовании подхода, предполагающего совместное интегрирование уравнений динамики вязкой жидкости и уравнений движения АНПА. Для моделирования скачка плотности использовался метод VOF (Volume of Fluid). На рисунке 6 представлено сравнение параметров движения глайдера при использовании классического (аппроксимация ГДХ в виде зависимостей от угла атаки  $\alpha$ ) и сопряженного (вычисление сил и моментов в процессе движения) подходов. Можно отметить, что учет изменения ГДХ при движении вблизи скачка плотности оказывает значительное влияние на параметры движения АНПА.

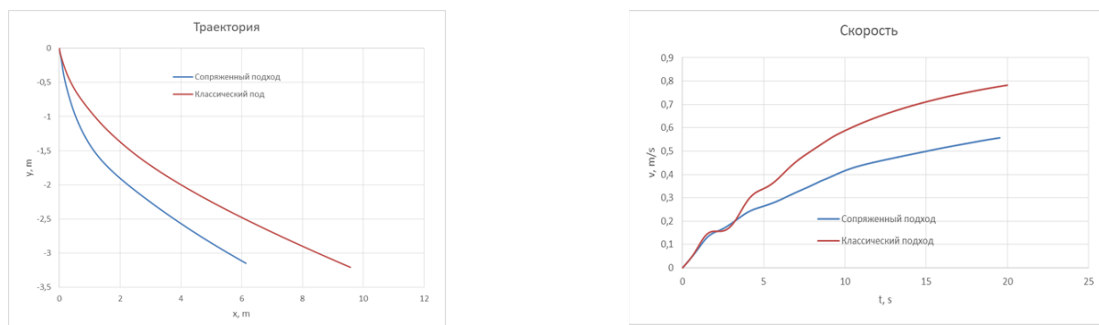


Рисунок 6 – Параметры движения глайдера при использовании классического и сопряженного подходов

Таким образом, в результате выполнения работы была предложена методология моделирования движения глайдера дискообразной формы в стратифицированной среде, а также общий вид системы управления, которая позволяет АНПА совершать маневрирование в заданном диапазоне глубин. Показана важность учета изменения ГДХ подводного объекта при движении вблизи пикноклина, а также возможность решения данной задачи на основе применения сопряженного подхода, предполагающего вычисление гидродинамических воздействий на АНПА в процессе движения.

## Список литературы

- [1] Koterayama W., Nakamura M., Ito Y., Yoshimura H. Autonomous Underwater Vehicle for Practical Use in Ocean Observations. Proceedings of the Tenth (2012) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. Vladivostok, Russia, October 3-5, 2012, pp. 170-175.
- [2] Пантов Е.Н. Основы теории движения подводных аппаратов / Е.Н. Пантов, Н.Н. Махин, Б.Б. Шереметов – Л.: Судостроение, 1973.
- [3] Рождественский В.В. Динамика подводной лодки / В.В. Рождественский – Т1. Л.: Судостроение, 1970.
- [4] Краснодубец, Л.А. Управление морскими буями-профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Синтез и моделирование системы управления / Л.А. Краснодубец, В.И. Забурдаев, В.В. Альчаков // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 5, С. 70 – 82.
- [5] Гурьев Ю.В., Слуцкая М.З. Основные закономерности гидродинамического воздействия природных морских условий на подводные объекты. Спб., Научный журнал «Морские интеллектуальные технологии» № 2 том 1, 2020, с. 10-16.