

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОИСКА ПОЛЫНИИ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАНЕВРИРОВАНИЯ ПО КРЕНУ И ДИФФЕРЕНТУ

Л.А. Мартынова, Р.И. Якупов, Д.А. Знаменский (Санкт-Петербург)

Введение

Для уточнения своего местоположения автономному обитаемому подводному аппарату (АНПА) необходимо периодически проводить обсервацию по сигналам спутниковых навигационных систем, для чего – всплывать на поверхность воды. В условиях льда для обсервации необходимо найти полынь, причем подходящего размера, пятикратно превышающего размеры корпуса АНПА [1]. Для обнаружения полыни слабопроизводительным эхоледомером, расположенным в верхней части корпуса АНПА, необходимо выполнить десятки галсов [2]. В то же время при обследовании морского дна [3] с целью поиска донных объектов или подводных силовых и волоконно-оптических кабелей АНПА использует высокотехнологичное поисковое оборудование, включающее многолучевой эхолот, гидролокатор бокового обзора и видеокамеру. Поисковое оборудование для обследования дна размещено в подкильной области АНПА. Современное развитие робототехники позволяет создавать так называемые гидробатические АНПА, способные наряду с длительным поступательным движением совершать эффективные и безопасные маневры по дифференту/рысканию в диапазоне 0–360° «на пятачке» [4–6]. Возможность использования таких АНПА позволяет пересмотреть традиционные алгоритмы поиска полыни и всплытия в ней и взамен существующих алгоритмов разработать новые, более эффективные, с учетом возможности маневрирования АНПА по крену/дифференту. Для тестирования новых алгоритмов управления АНПА необходимо проведение численных экспериментов, для чего потребовалась разработка имитационной модели функционирования торпедообразного АНПА со способностью маневрирования по крену и дифференту. Этим определяется актуальность исследований.

Для достижения цели в работе решены следующие задачи:

- разработана имитационная модель функционирования АНПА при поиске полыни и проведении обсервации с использованием маневрирования по крену и дифференту; в основу разработки положены основополагающие принципы имитационного моделирования, заложенные в [7–9];
- проведена валидация имитационной модели по результатам натурных экспериментов с использованием специально разработанного макета АНПА;
- проведены численные эксперименты с использованием разработанной имитационной модели.

В основу разработки имитационной модели положен следующий алгоритм поведения АНПА с использованием маневрирования по крену и дифференту. Пусть АНПА обследует дно с использованием высокотехнологичной поисковой аппаратуры, и наступило время проведения обсервации. Для этого АНПА всплывает к нижней кромке льда, маневрирует по крену и переходит в положение «оверкиль». В таком положении АНПА ведет поиск полыни подкильной поисковой аппаратурой. После обнаружения полыни АНПА меняет дифферент так, чтобы корпус АНПА принял вертикальное положение, и в таком положении всплывает в полынь и проводит обсервацию. После завершения обсервации АНПА в вертикальном положении погружается под воду, совершает обратный маневр по дифференту, маневрирует по крену на 180°, после чего заглубляется на поисковую глубину и продолжает обследование морского дна (рис. 1).

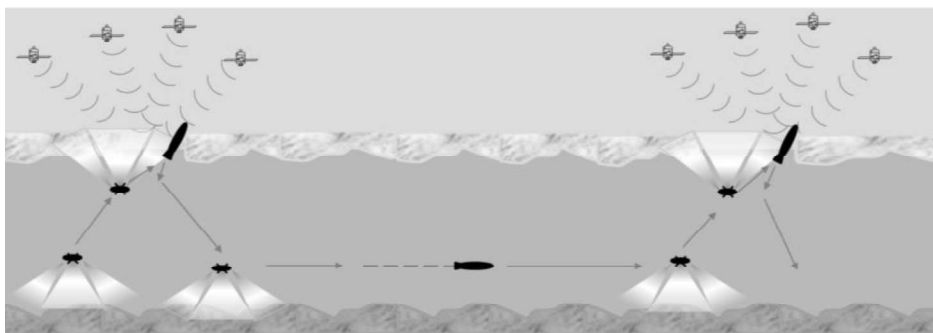


Рис. 1. Схема последовательного выполнения поисковых работ на морском дне и поиска полыньи для обсервации

При разработке имитационной модели потребовалось:

- учесть влияния статических и гидродинамических сил на положение корпуса АНПА в воде;
- для моделирования положения АНПА в водной среде разработать динамическую модель создания сил и моментов, обеспечивающих маневрирование по крену и дифференту;
- моделировать функционирование поисковых средств в процессе обнаружения полыньи по классификационным признакам, а также математически формализовать имитацию «подыгрывания» среды, в которой происходит поиск полыньи, поскольку рассматривается обнаружение открытой воды расположенным в подкильной области корпуса АНПА поисковым оборудованием.

Структура имитационной модели включает в свой состав:

- динамическую модель АНПА как тела, погруженного в жидкость;
- математическую модель управляемого изменения крена и дифферента АНПА;
- модель функционирования акустической поисковой аппаратуры, классифицирующей полынью по результатам сопоставления показаний датчика глубины с показаниями акустического датчика, измеряющего расстояния до объектов;
- модель функционирования оптического средства в видимом диапазоне с подсветкой, классифицирующего полынью по оценке яркости и контраста изображения диодной подсветки;
- модель среды с классификационными признаками полыньи на фоне льда.

1. Динамическая модель поступательного движения АНПА

Для описания движения АНПА с учетом влияния статических и гидродинамических сил введем систему координат $Oxyz$, связанную с корпусом АНПА с центром, совпадающим с положением центра величины (ЦВ) [10], как показано на рис. 2.

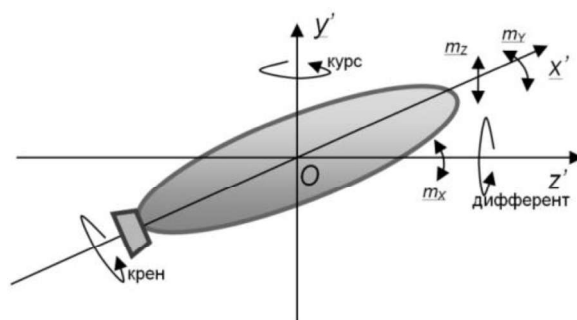


Рис. 2. Силы и моменты, действующие на корпус АНПА в морской среде

Математическая модель пространственного движения объекта строится на базе системы дифференциальных уравнений, записанных в нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned}\frac{dv_i}{dt}(M + M_{np}) &= \sum F_i; \\ \frac{d\omega_i}{dt}(J + J_{np}) &= \sum M_i,\end{aligned}$$

где M – масса АНПА, Н·с²/м; M_{np} – присоединенная масса воды, Н·с²/м; v_x, v_y, v_z – проекции (составляющие) вектора скорости на оси связанной системы координат, м/с; $\sum F_x, \sum F_y, \sum F_z$ – суммы проекций всех сил, действующих на объект, на оси связанной системы координат, Н; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора угловой скорости аппарата, с⁻¹; J – момент инерции массы АНПА относительно главных осей, проходящих через центр тяжести полного подводного объема, Н·м·с²; J_{np} – момент инерции присоединенной массы АНПА относительно главных осей, проходящих через центр тяжести полного подводного объема, Н·м·с²; M_x, M_y, M_z – моменты всех сил, действующих на объект, на оси связанной системы координат, Н·м.

В приведенных уравнениях наряду с учетом традиционных сил и моментов потребовался учет также в уравнении для M_x момента, создаваемого для управляемого изменения крена; в уравнении для M_z момента, создаваемого для управляемого изменения дифферента.

В основу имитации маневрирования АНПА по крену положен запатентованный авторами способ [11] с использованием перекачки жидкости между четырьмя эластичными емкостями. Эластичные емкости размещены: одна – внизу корпуса, вторая – по правому борту, третья – вверху корпуса, четвертая – по левому борту; при этом эластичные емкости соединены между собой гибкими трубками для перегонки воды между емкостями в целях сохранения постоянной плавучести АНПА. На вход алгоритма подаются целевой угол крена θ^* и текущий крен θ АНПА и передаются в систему управления АНПА. Если текущее значение угла θ крена АНПА не совпадает с целевым θ^* , то определяется рассогласование $\Delta\theta$ между текущим θ и целевым θ^* значениями крена:

$$\Delta\theta = \theta - \theta^*$$

Требуемое значение кренящего момента M_x^* определяется выражением:

$$M_x^* = -K_{п\theta} \cdot \Delta\theta - K_{д\theta} \cdot \frac{d(\Delta\theta)}{dt},$$

где $K_{п\theta}$ – пропорциональный коэффициент закона регулирования угла крена; $K_{д\theta}$ – дифференциальный коэффициент закона регулирования угла крена. Исходя из требуемого момента M_x^* , определяются объемы жидкости в каждой из эластичных емкостей, после чего происходит перекачка жидкости между емкостями. Так повторяется до тех пор, пока полученное значение θ не совпадает с заданным θ^* .

Для маневрирования по дифференту, по аналогии с маневрированием по крену, также рассмотрено использование эластичных емкостей, расположенных в кормовой и в носовой частях АНПА. В соответствии с алгоритмом изменения дифферента ψ до целевого значения ψ^* используется алгоритм, аналогичный, по сути, алгоритму изменения крена. Если текущее значение угла дифферента ψ АНПА не совпадает с заданным ψ^* , то определяется рассогласование $\Delta\psi$ между текущим ψ и заданным ψ^* значениями углов дифферента:

$$\Delta\psi = \psi - \psi^*.$$

Требуемое значение вращающего момента M_z^* определяется выражением:

$$M_z^* = -K_{\Pi\psi} \cdot \Delta\psi - K_{Д\psi} \cdot \frac{d(\Delta\psi)}{dt};$$

где $K_{\Pi\psi}$ – пропорциональный коэффициент закона регулирования угла дифферента; $K_{Д\psi}$ – дифференциальный коэффициент закона регулирования угла дифферента.

Так повторяется до тех пор, пока полученное значение ψ не совпадет с заданным ψ^* .

Из описания алгоритма управляемого изменения крена/дифферента видно, что для имитации процесса изменения крена/дифферента в имитационной модели необходимо задать целевое значение крена/дифферента и воспроизвести процесс их изменения. Текущее значение крена/дифферента определяется из динамических уравнений положения АНПА как тела, погруженного в жидкость.

Традиционное выражение для определения момента M_x в отсутствии эластичных емкостей, наполненных водой или воздухом, имеет вид:

$$M_x = m_x \cdot \frac{\rho v^2}{2} V - h \cdot P_0 \sin \theta \cos \psi - h \cdot P_{об} \sin \theta \cos \psi,$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; v – вектор скорости движения АНПА; V – полное подводное объемное водоизмещение АНПА, м³; ψ – угол дифферента, град; m_x – позиционный коэффициент кренящего момента; h – метацентрическая высота, отнесенная к полному подводному объему АНПА, м; P_0 – начальная (эксплуатационная) избыточная плавучесть, Н; $P_{об}$ – плавучесть, возникающая в результате обжатия корпуса, Н.

2. Моделирование создания момента для управляемого изменения крена

При использовании дополнительных эластичных емкостей № 1,2,3,4, создающих кренящий момент за счет перекачки жидкости, уравнение для момента M_x примет вид:

$$\begin{aligned} M_x = m_x \cdot \frac{\rho v^2}{2} V - h \cdot P_0 \sin \theta \cos \psi - h \cdot P_{об} \sin \theta \cos \psi + P_1 \left(z_{1C} \cos \left(\theta + \frac{3\pi}{2} \right) \cos \psi - y_{1C} \sin \left(\theta + \frac{3\pi}{2} \right) \right) + \\ P_2 (z_{2C} \cos \theta \cos \psi - y_{2C} \sin \theta) + P_3 \left(z_{3C} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) \cos \psi - y_{3C} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) \right) + \\ P_4 (z_{4C} \cos(\theta + \pi) \cos \psi - y_{4C} \sin(\theta + \pi)), \end{aligned}$$

где $z_{1C}, z_{2C}, z_{3C}, z_{4C}$ – расстояния по ширине АНПА от ЦВ полного подводного объема АНПА до центра тяжести (ЦТ) эластичных емкостей №1, 2, 3, 4, соответственно, м; $y_{1C}, y_{2C}, y_{3C}, y_{4C}$ – расстояние по высоте АНПА от ЦВ полного подводного объема АНПА до ЦТ эластичных емкостей №1, 2,3,4, соответственно, м; P_1, P_2, P_3, P_4 – плавучести эластичных емкостей №1, 2, 3, 4, соответственно, Н.

Моменты сил тяжести всех эластичных емкостей определяются выражением:

$$\begin{aligned} M_{ix} &= \sum_{i=1}^4 m_i l_i \sin \left(\theta + j \frac{\pi}{2} \right) \\ M_{iy} &= \sum_{i=1}^4 m_i l_i \cos \left(\theta + j \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned}$$

где $i=1,2,3,4$ – номера эластичных емкостей, соответственно; $j = 0,1,2,3$ для эластичных емкостей №1,2,3,4, соответственно; m_1, m_2, m_3, m_4 – текущие массы эластичных емкостей №1,2,3,4, соответственно, кг; l_1, l_2, l_3, l_4 – проекции расстояний до ЦТ эластичных емкостей №1,2,3,4 на ось Oz , м.

Общая масса воды в эластичных емкостях:

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$$

Координаты (x_{ct}, y_{ct}) текущего положения ЦТ АНПА определяются как отношение моментов сил тяжести всех эластичных емкостей к общей массе воды в них [12]:

$$x_{ct} = \frac{M_{ix}}{M}$$

$$y_{ct} = \frac{M_{iy}}{M}$$

Положение метацентрической высоты АНПА, определяется выражением [13]:

$$h = y_{cw} - y_{ct},$$

где координаты ЦВ $x_{cw}=0$ и $y_{cw}=0$.

Угловая скорость ω_x изменения крена АНПА определяется выражением [10]:

$$\frac{d\omega_x}{dt} = \frac{M_x}{\rho \cdot I_x (1 + k_{44})}$$

где I_x – момент инерции АНПА относительно продольной оси Ox , кг·м²; k_{44} – коэффициент момента инерции относительно оси Ox , безразмерный. Момент инерции I_x АНПА определим как момент инерции заполненного однородного твердого цилиндра радиуса r (м), равного радиусу корпуса АНПА:

$$I_x = mr^2/2,$$

где m – масса АНПА, кг.

Скорость изменения крена, град./с:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_x$$

Значение угла крена:

$$\theta = \theta_0 + \frac{d\theta}{dt} T,$$

где T – период времени, за который произошло изменение крена, с.

На рис. 3 изображены результаты моделирования маневрирования АНПА по крену: общий план (слева), изменение с течением времени кренящего момента (вверху) и угла крена (внизу).

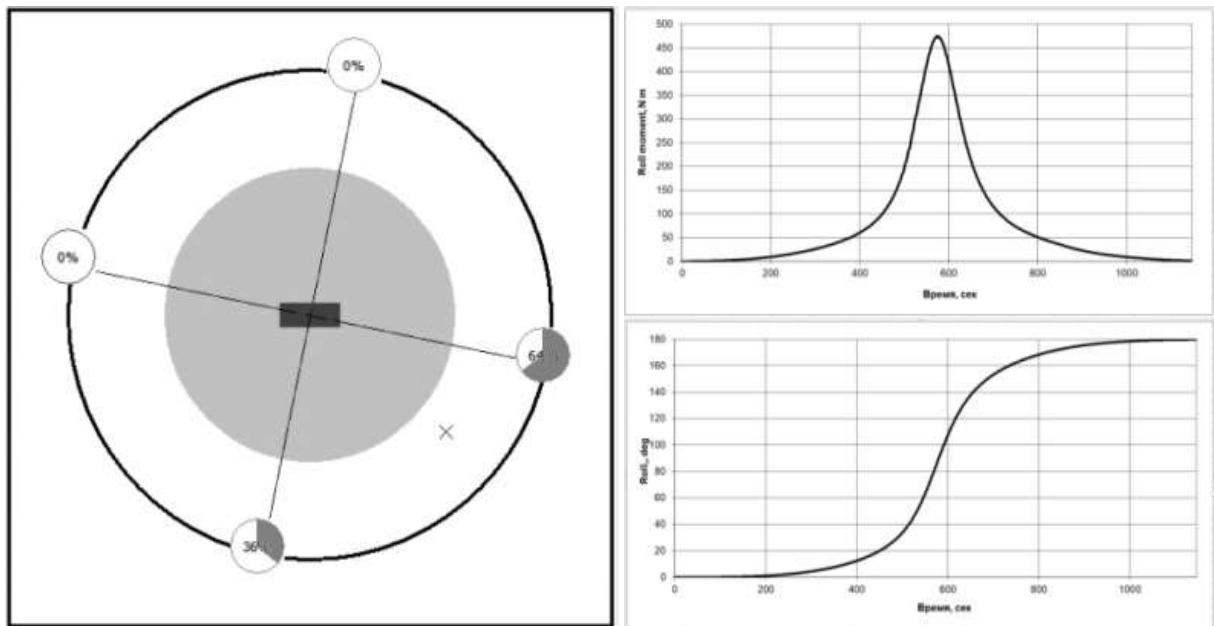


Рис. 3. Результаты моделирования маневрирования АНПА по крену

3. Моделирование создания момента для управляемого изменения дифферента

Уравнение момента, создаваемого в результате перекачки жидкости между кормовой и носовой эластичными емкостями АНПА имеет вид:

$$\begin{aligned} \Sigma M_z = m_z \cdot \frac{\rho v^2}{2} V - h D \sin \psi - h P_o \sin \psi - h P_{oo} \sin \psi + \\ + P_H (x_{HЦ} \cos \theta \cos \psi - y_{HЦ} \sin \psi) + P_K (x_{KЦ} \cos \theta \cos \psi - y_{KЦ} \sin \psi), \end{aligned}$$

где P_H – плавучесть носовой эластичной емкости, Н; P_K – плавучесть кормовой эластичной емкости, Н; $x_{HЦ}$ – координата по оси Ox носовой эластичной емкости, м; $y_{HЦ}$ – координата по оси Oy носовой эластичной емкости, м; $x_{KЦ}$ – координата по оси Ox кормовой эластичной емкости, м; $y_{KЦ}$ – координата по оси Oy кормовой эластичной емкости, м.

В результате создания момента M_z происходит смещение положения ЦТ АНПА и метацентрической высоты АНПА. В результате созданного момента M_z в вертикальной плоскости xOy происходит изменение угловой скорости ω_z и изменение дифферента ψ АНПА.

На рис. 4 приведены результаты моделирования маневрирования АНПА по дифференту: общий план (слева), изменение с течением времени вращающего момента (вверху) и дифферента (внизу).

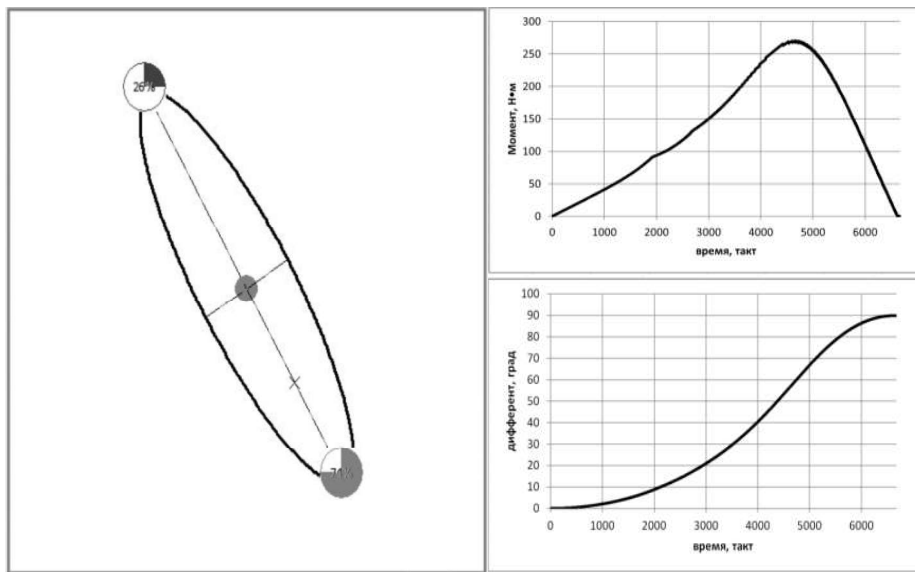


Рис. 4. Результаты моделирования маневрирования АНПА по дифференту

4. Моделирование функционирования поисковых средств

При любой толщине льда он всегда частично погружен в воду, и расстояние до нижней кромки льда, измеряемое акустическими средствами, всегда меньше расстояния до открытой воды; расстояние менее 5 см [1] является классификационным признаком полыньи.

Функционирование оптических поисковых средств основано на оценке темного/светлого тонов изображений и на оценке яркости и контраста изображения [14]. В отличие от традиционного подхода, при котором расстояние до льда/воды измеряется по известному положению имитируемого объекта, в данных исследованиях имитация его работы представлена в виде многолучевого сектора, каждый луч состоит из множества последовательных отрезков, по каждому отрезку

луча определяется попадание его конца на определенный цвет пикселя «льда». Как только конец текущего отрезка попадает на цвет «льда» или открытой воды, по положению текущего отрезка регистрируется расстояние до льда или открытой воды. На рис. 5 показано изменение расстояния R между уровнем воды и нижней кромкой льда. Такой подход к моделированию акустического средства является более реалистичным.

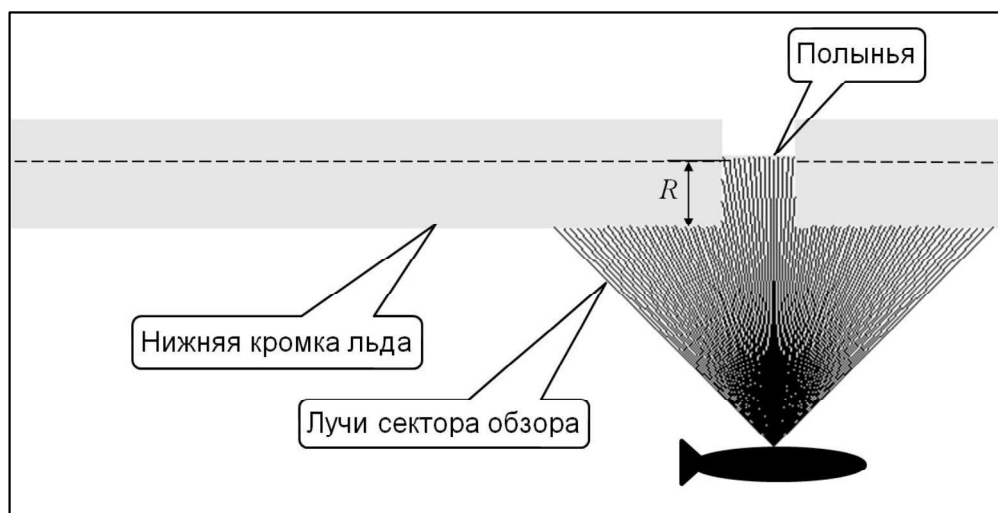


Рис. 5. Результат моделирования положения лучей зоны обзора акустического поискового средства при обнаружении полыньи

Для «подыгрывания» функционированию акустических средств потребовалось, с одной стороны, подыгрывать свойства льда как твердого непрозрачного объекта, с другой стороны – имитировать реакцию акустических средств на лед и поверхность вода–воздух.

При имитации функционирования оптических средств обнаружения оценивается цвет и яркость изображения, четкость отражения диодов подсветки [15]. Для этого специально имитируются изображения с различными цветом и яркостью путем наделения каждого пикселя изображения определенными параметрами. Каждый пиксель характеризуется координатами положения на плоскости (x, y) и цветом, характеризуемым тремя цветовыми параметрами R,G,B (Red, Green, Blue – красный, зеленый, синий).

Таким образом при имитации создано поле, характеризуемое пикселями, которым назначены различные цвета так, чтобы были сформированы классификационные признаки полыньи.

Реакция оптических средств на цветовую гамму смоделирована следующим образом:

- определяется положение сектора обзора оптического средства;
- определяется положение нижней кромки льда, попадающей в зону обзора акустического поискового средства;
- анализируются пиксели в области путем построения гистограммы распределения цвета и анализа положения неоднородностей (ярких пятен), как это выполняется в реальной аппаратуре.

Перед тем, как использовать разработанную имитационную модель для проведения численных экспериментов, потребовалась ее валидация. Для этого специально разработан макет гидробатического АНПА, способный маневрировать по крену и дифференту.

5. Макет АНПА

Внешний вид макета гидробатического АНПА представлен на рис. 6: оборудование АНПА без корпуса собрано в модульном исполнении и прикреплено к раме (справа).



Рис. 6. Внешний вид макета гидробатического АНПА

Цель создания макета:

- оценка скорости переливания жидкости, зависящая от производительности откачивающего насоса каждой эластичной емкости;
- оценка необходимого объема эластичных емкостей;
- оценка конструктивного расположения эластичных емкостей;
- способность акустического датчика различать разность расстояний (на уровне погрешностей);
- способность оптического датчика различать полынью в светлое время суток;
- способность оптического датчика различать полынью в темное время суток.

В состав макета АНПА входит плата управления, на которой установлены: Wi-Fi-канал, плата управления на базе Arduino, плата управления на базе ESP, гироскоп с акселерометрами; четыре эластичные емкости, соединенные между собой трубками для перекачивания жидкости для изменения крена; две эластичные емкости для изменения дифферента; шесть насосов, соединенных с эластичными емкостями трубками; реле управления (контроллер) насосами; аккумуляторные батареи; повышающий и понижающий преобразователи напряжения; рама несущей конструкции, изготовленной в модульном исполнении; корпус макета, в который встроены акустический и оптический датчики с диодной подсветкой. В дополнение к макету АНПА использовался персональный компьютер/смартфон для задания целевых значений крена/дифферента и для отображения результатов их изменения с течением времени. Для управления всем перечисленным оборудованием макета специально разработано программное обеспечение. Программа содержит алгоритм управления креном/дифферентом. Программа, размещенная на контроллере управления макетом, написанная на алгоритмическом языке С, обеспечивает управление насосом, предоставляет данные от гироскопа, обеспечивает непосредственное управление включением/выключением реле, предназначенного для подачи напряжения на двигатели насоса. Одновременно на ноутбуке рядом с видео в графическом виде отображаются текущие значения крена и дифферента.

В ходе натурного эксперимента фиксировалось начальное положение макета, задавались целевые значения крена/дифферента и передавались в макет аппарата. В макете аппарата поэтапно заполнялись жидкостью емкости в соответствии с алгоритмом управления, в результате чего происходило изменение крена/дифферента. Данные о текущем угле крена/дифферента передавались в управляющую программу с частотой 1 Гц. Натурный эксперимент проводился в лабораторных и реальных условиях в акватории Петропавловской крепости в условиях ветра, волнения, течения (рис. 6, слева, сверху и внизу).

В ходе проведения натурного эксперимента в лабораторных условиях, направленных на обнаружения объектов на дне и обнаружения льда на поверхности воды, была создана близкая к 0°C температура воды. Цель эксперимента – оценить погрешности определения расстояния до объектов на дне, расстояний до нижней кромки льда и до поверхности открытой воды. Кроме того, регистрировались реальные изображения объектов, полученные оптическим средством, с тем, чтобы затем воспроизводить их при имитационном моделировании. На первом этапе эксперимента акустический и оптический датчики совместно перемещались на незначительной глубине над объектами, расположенными на дне (рис. 7, слева). Результаты эксперимента показали изменение расстояния при движении акустического датчика над дном и над объектом. На втором этапе акустический датчик вместе с видеокамерой перемещался вблизи дна с развернутыми к поверхности воды зонами обзора. На поверхности воды плавал заранее замороженный лед и снег (эксперимент проводился 01.02.2026 в 20°-градусный мороз, что позволило использовать естественный снег). При постепенном движении акустического датчика вместе с видеокамерой вблизи дна наблюдалось изменение расстояния при переходе от льда к открытой поверхности и обратно (рис. 7, справа). Результаты эксперимента показали возможность измерения акустическим датчиком расстояния из-под воды до льда при его толщине до 0,5 см, степень затемнения при переходе от открытой воды к льду, снегу и обратно. Для более тонкого льда определена степень четкости отражения диодной подсветки (рис. 8). Результаты натурных испытаний были учтены при моделировании изображений для имитации обнаружения открытой воды среди льда.

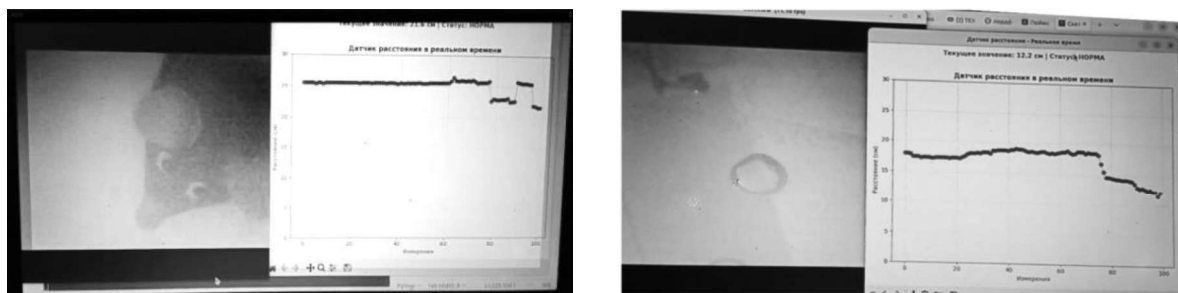


Рис. 7. Наблюдение объектов на дне и на поверхности воды одними и теми же акустическим и оптическим средствами поиска

На рис. 8 показано обнаружение оптическими поисковыми средствами с диодной подсветкой льда на поверхности воды.

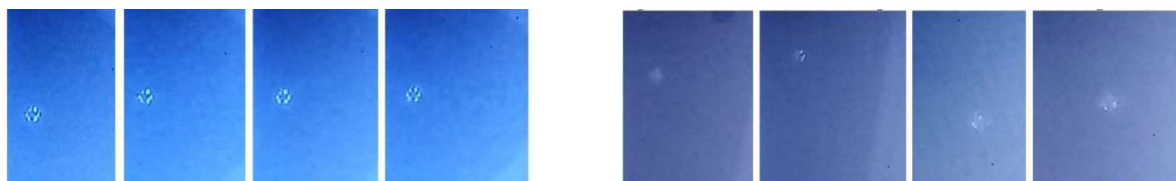


Рис. 8. Вид отражения диодной подсветки от раздела вода–воздух от открытой воды (слева) и льда (справа)

Результаты натурных экспериментов реализованы в имитационной модели поиска полыньи АНПА с использованием маневрирования по крену и дифференту.

С использованием имитационной модели проведены численные эксперименты, направленные на определение параметров управления маневрированием по крену и по дифференту и выбор наиболее целесообразной траектории движения АНПА при поиске полыньи и всплытии в ней для проведения обсервации с обратным возвращением на заданную поисковую траекторию.

Заключение

Новизна разработанной имитационной модели заключается в реализации расширенных возможностей торпедообразного АНПА по изменению крена и дифферента в диапазоне 0–360°, способности формирования условий для имитации функционирования поисковых средств АНПА при поиске полыньи и всплытии для проведения обсервации АНПА по сигналам спутниковых навигационных систем в ледовых условиях. В имитационной модели реализованы результаты натурных испытаний по обнаружению полыньи акустическими и оптическими поисковыми средствами. Разработанная имитационная модель позволяет тестировать новые алгоритмы управления АНПА с возможностью изменения крена и дифферента при поиске полыньи и проведении обсервации, а также при выполнении других подводных работ, требующих маневрирования АНПА по крену и дифференту «на пятачке».

Литература

1. **Багницкий А.В., Инзарцев А.В., Панин М.А.** Алгоритмическое обеспечение работы АНПА подо льдом в приполярных районах // Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies. 2023. № 3. Часть 1, С.98–109. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.61.3.011>.
2. **Лаптев К.З., Багницкий А.В.** Задача для АНПА дальнего радиуса действия по поиску полыньи при плавании в арктических районах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. Номер: 1 (203) 1-28-38, DOI 10.23683/2311-3103-2019.
3. **Мартынова Л.А.** Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // Информационно-управляющие системы. 2017. № 1 (86). С. 83–92.
4. **Stenius I., Folkesson J., Bhat S., Sprague Cl., Ling L., Özkahraman Ö., Bore N.** A system for autonomous seaweed farm inspection with an underwater robot // Sensors 22 (13), 5064.
5. **Duecker D.A., Bauschmann N., Hansen T., Kreuzer E., and Seifried R.** HippoCampus X _ A Hydrobatic Open-source Micro AUV for Con_ned Environments. In IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Symposium (AUV), pages 1_6, St. Johns, Canada (Virtual),2020. IEEE.
6. **Duecker D.A., Horst C., and Kreuzer E.** From Aerobatics to Hydrobatics: Agile Trajectory Planning and Tracking for Micro Underwater Robots. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 1_8, Prague (virtual), CZ, 2021. IEEE/RSJ.
7. **Микони С.В., Соколов Б.В. Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография С.В. Микони, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. М.: РАН, 2018. 314 с.
8. **Моисеев Н.Н.** Алгоритмы развития. М. Наука. 1987. 350 с.

9. **Davis P.K.** Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. P. 293–302.
10. **Киселев Н.К., Мартынова Л.А., Пашкевич И.В.** Математическая модель функционирования гибридной системы энергообеспечения в составе стенда отладки и сопровождения АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 1 (211). С. 170–187.
11. **Мартынова Л.А., Пашкевич И.В.** Способ управляемого изменения крена автономного необитаемого подводного аппарата. Патент 2823820. РФ. 25.03. 2024. Бюл. №22.
12. **Тарг С.М.** Краткий курс теоретической механики / С.М. Тарг. – М.: Высшая школа. 2010. 416 с.
13. Справочник по теории корабля. Статика судна. Качка судов / под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение. 1985. Т.2. 440 с.
14. **Balakin R.A., Vilkov G.I.** Investigation of acoustic properties of snow-covered sea ice. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018. 58 (3): 387–395. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-387-395.
15. **Пяткин В.П., Салов Г.И.** Обнаружение полыней // Тр. XI Междунар. научного конгресса и выставки «ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2015», Т.2 Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология, 13-25 апреля 2015, Новосибирск. С.77–82.