

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОИСКА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ В АКВАТОРИИ ПУТЕМ МАНЕВРИРОВАНИЯ ПО КРЕНУ**

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

### **Введение**

В развитии технологий ситуационного управления в настоящее время в настоящее время для подводного наблюдения прибрежной зоны [1–3] наиболее подходящим является автономный обитаемый подводный аппарат (АНПА) [4], в задачи которого входит обнаружение объектов на морской поверхности, на дне и в толще воды. Традиционно АНПА оснащен поисковыми средствами [5] – впередсмотрящим гидролокатором секторного обзора (ГСО), одно- или многолучевым эхолотом (МЛЭ) и гидролокатором бокового обзора (ГБО) [6–7]. ГБО размещают в подкильной зоне корпуса АНПА, что не позволяет ГБО одновременно с дном осматривать морскую поверхность и толщу воды. В то же время появление так называемых гидробатических АНПА [8], способных в ограниченном пространстве совершать резкие маневры по крену/дифференту/рысканию, могло бы устранить указанный недостаток. Поскольку создание и эксплуатация гидробатических АНПА связаны с определенными трудностями из-за возникновения турбулентных потоков при маневрировании, то возникает задача сопоставления преимуществ и недостатков гидробатических АНПА по сравнению с традиционными АНПА и оценки целесообразности перехода к использованию гидробатических АНПА для подводного наблюдения прибрежной зоны. Этим определяется актуальность исследований.

Сопоставление преимуществ и недостатков гидробатических АНПА по сравнению с традиционными АНПА предлагается вести по критерию эффективности, характеризующему степень достижения цели, заключающейся в обнаружении малоразмерных объектов в морской среде. Поскольку моменты появления объектов, их положение и параметры движения заранее не известны, целесообразно оценивать критерий эффективности с использованием метода статистических испытаний путем многократного проведения процесса поиска объектов в заданной акватории. В процессе поиска процесс движения объектов и изменение положения зон обзора поисковых средств ГСО и ГБО происходят независимо, в связи с чем наиболее целесообразным является имитационное моделирование движения случайных объектов и АНПА.

**Целью** работы явилась разработка имитационной модели оценки эффективности функционирования традиционного и гидробатического АНПА при подводном наблюдении малоразмерных объектов в прибрежной зоне.

### **1. Особенности поиска объектов с использованием АНПА и его поисковых средств**

Для обследования дна, а также в целях безопасности АНПА, его оборудуют впередсмотрящим гидролокатором секторного обзора (ГСО), а для обследования дна – ГБО. Для обследования дна и толщи воды традиционный АНПА находится на определенной глубине, в результате верхний слой воды над АНПА оказывается необследованным. Для устранения этого недостатка дополнительно используют безэкипажные катера (БЭК), как это показано на рис. 1 слева.

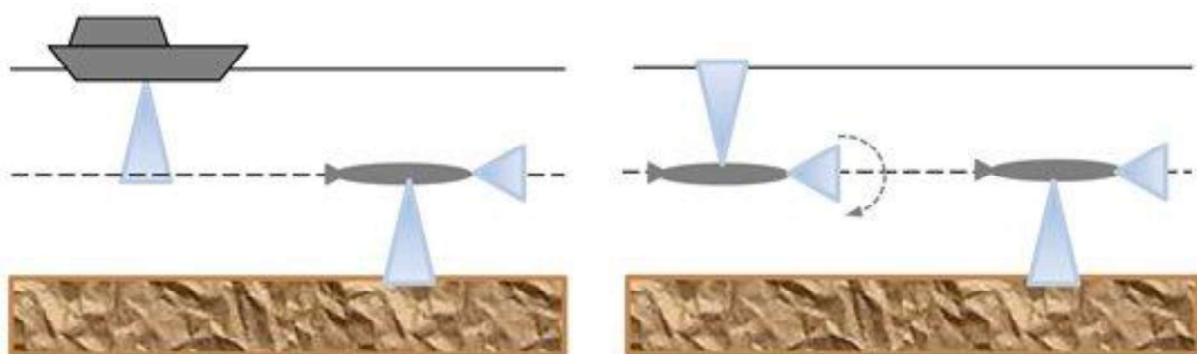


Рис. 1. Положение зон обзора поисковых средств БЭК и традиционного АНПА

Использование БЭК требует согласованного поведения с АНПА [9], синхронизации, обмена информацией, что существенно усложняет ведение подводного наблюдения.

При применении гидробатического АНПА с маневрированием по крену в диапазоне  $0-360^\circ$  отпадает необходимость использования БЭК, так как зоны обзора поисковых средств АНПА полностью перекрывают обследуемый диапазон глубин. За счет маневрирования по крену также отпадает необходимость дублирования поисковой аппаратуры в верхней части корпуса АНПА. Размещение ГБО перпендикулярно к направлению движения АНПА, как показано на рис. 2, позволяет обследовать вдвое большую полосу при винтовом движении АНПА в горизонтальном направлении на средней глубине, переводя зоны обзора из нижней полусферы во все направления вокруг АНПА в диапазоне  $0-360^\circ$ .

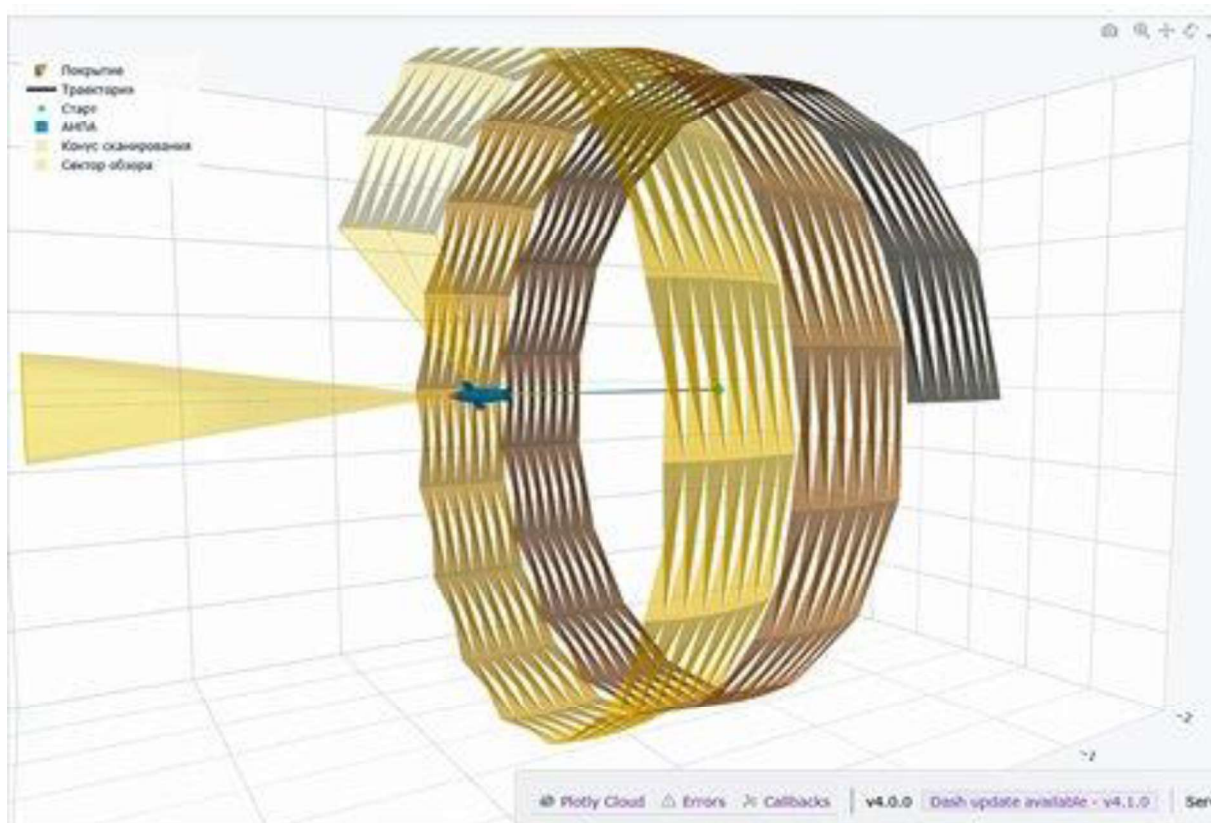


Рис. 2. Положение зон обзора поисковых средств гидробатического АНПА

На рис. 2 сектором перед АНПА обозначена зона обзора ГСО; сектором, направленным перпендикулярно направлению движения АНПА, обозначена зона обзора «развернутого» ГБО.

При использовании традиционного АНПА для увеличения вдвое полосы обзора в горизонтальной плоскости требуется движение АНПА двумя галсами (рис. 3, слева); для покрытия этой же полосы обзора гидробатическому АНПА требуется однократный проход (рис. 3, справа).

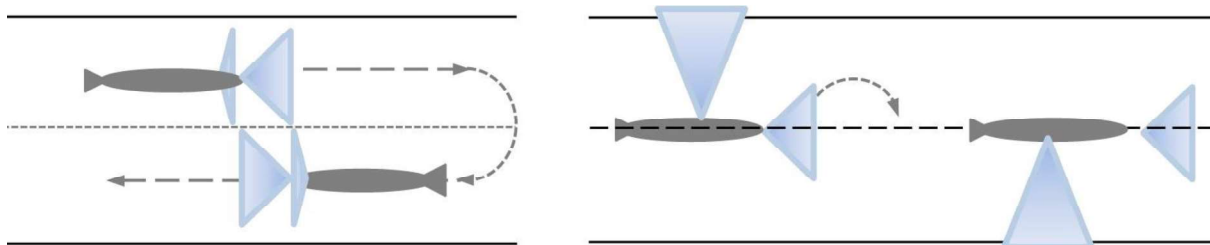


Рис. 3. Вид сверху положения зон обзора поисковых средств традиционного АНПА (слева) и гидробатического АНПА (справа) при обследовании полосы одинаковой ширины

Таким образом, винтовое движение АНПА имеет неоспоримое преимущество перед использованием традиционного АНПА, однако из-за вращения зоны обзора ГБО часть объектов может быть пропущена, пока сектор обзора ГБО находится с противоположной стороны относительно корпуса АНПА. В связи с этим возникает необходимость определения параметров функционирования гидробатического АНПА для эффективного обнаружения объектов вне зависимости от скорости их движения.

Для оценки выигрыша от использования гидробатического АНПА по сравнению с традиционным АНПА в качестве критерия эффективности выбрана вероятность обнаружения объектов в обследуемом районе: чем выше вероятность обнаружения объектов, тем более эффективно ведется подводное наблюдение.

Для оценки эффективности функционирования традиционного и гидробатического АНПА потребовалась разработка имитационной модели.

## 2. Имитационная модель

Имитационная модель оценки эффективности функционирования АНПА при поиске объектов включает в себя:

- модель движения АНПА;
- модель движения подвижного/неподвижного объекта, движущегося в направлении АНПА;
- модель пространственного положения зон обзора поисковых средств при маневрировании АНПА по крену;
- модель обнаружения объектов поисковыми средствами АНПА;
- блок статистических накоплений и расчета вероятности обнаружения объектов.

Ниже приведено описание перечисленных блоков имитационной модели.

### *Модель движения АНПА*

Для задания размеров обследуемой акватории, положения и движения АНПА и объектов введем глобальную систему координат  $Oxyz$ , ось  $Oz$  является продольной

и совпадает с направлением прямолинейного движения АНПА, ось  $Oy$  является вертикальной, ось  $Ox$  образует правую тройку с осями  $Oy$  и  $Oz$ .

Относительно степени детализации моделируемых процессов имитационной модели отметим, что для оценки эффективности достаточно моделировать процессы движения АНПА и объектов на кинематическом уровне [10]. Поскольку в данном случае цель имитационного моделирования заключается в оценке целесообразности маневрирования АНПА по крену, то для этого достаточно ограничиться моделированием движения АНПА как материальной точки и моделированием положения секторов обзора ГСО и ГБО в пространстве, без учета деталей обнаружения объекта по соотношению сигнал/помеха и рабочей характеристики приемника. Эти детали учитываются при анализе дальности обнаружения объектов поисковыми средствами, которые в данной работе не рассматриваются, но в то же время эти данные используются в разрабатываемой имитационной модели в качестве исходных данных. В связи со сказанным функционирование средств обнаружения достаточно моделировать на «геометрическом» уровне, при котором обнаружение объекта формализуется попаданием объекта в пределы сектора обзора поисковых средств АНПА.

Движение АНПА в общем случае характеризуется выражениями:

$$\begin{aligned}x_a(t) &= x_a(t-1) + V_{ax} \cdot \Delta t \cdot \sin(Q_a) \cdot \cos(\psi_a); \\y_a(t) &= y_a(t-1) + V_{ay} \cdot \Delta t \cdot \cos(Q_a) \cdot \cos(\psi_a); \\z_a(t) &= z_a(t-1) + V_{az} \cdot \Delta t \cdot \sin(\psi_a),\end{aligned}$$

где  $x_a, y_a, z_a$  – координаты АНПА,  $Q_a$  – курс АНПА,  $V_a$  – скорость АНПА,  $\Psi_a$  – дифферент АНПА;  $\Delta t$  – длительность такта имитации; под тактом имитации понимается промежуток времени между моментами, в которые происходит пересчет координат АНПА, объектов, положения зон обзора поисковых средств.

#### ***Модель движения объекта***

В качестве объектов рассмотрены неподвижные объекты, а также подвижные объекты, движущиеся в направлении АНПА.

Модель движения подвижного, движущегося в направлении АНПА объекта определяется выражениями:

$$\begin{aligned}x_o(t) &= x_o(t-1) + V_{ox} \cdot \Delta t \cdot \sin(Q_o) \cdot \cos(\psi_o); \\y_o(t) &= y_o(t-1) + V_{oy} \cdot \Delta t \cdot \cos(Q_o) \cdot \cos(\psi_o); \\z_o(t) &= z_o(t-1) + V_{oz} \cdot \Delta t \cdot \sin(\psi_o),\end{aligned}$$

где  $x_o, y_o, z_o$  – координаты объекта;  $Q_o$  – курс объекта;  $V_o$  – скорость объекта;  $\Psi_o$  – дифферент объекта.

#### ***Моделирование обнаружения объекта традиционным АНПА***

Приведем условия попадания объекта в зоны обзора традиционного АНПА. Особенность положения зон обзора заключается в том, что они движутся синхронно с АНПА вдоль продольной линии.

#### ***Моделирование обнаружения объекта ГСО***

Условие попадания в зону обзора ГСО по дальности определяется выражением:

$$\sqrt{(x_o - x_a)^2 + (y_o - y_a)^2 + (z_o - z_a)^2} \leq R_{GSO},$$

где  $R_{GSO}$  – дальность обнаружения ГСО.

По результатам выполнения этого условия осуществляется переход к проверке следующего условия – попадания объекта в пределы сектора обзора по углам в горизонтальной (ГП) и вертикальной плоскостях (ВП) ГСО.

Для проверки условия вычисляется угол положения объекта в ГП:

$$\alpha_o = \arctan \frac{(x_o - x_a)}{(z_o - z_a)},$$

после чего проверяется нахождение объекта по углу в ГП в пределах сектора обзора ГСО:

$$|\alpha_o| \leq \alpha_{GSO}.$$

Аналогичным образом определяется попадание объекта в сектор обзора ГСО в вертикальной плоскости. Вычисляется угол положения объекта в ВП:

$$\beta_o = \arctan \frac{(y_o - y_a)}{(z_o - z_a)},$$

после чего проверяется выполнение условия нахождения объекта в пределах сектора обзора ГСО в ВП:

$$|\beta_o| \leq \beta_{GSO},$$

где  $\alpha_{GSO}$ ,  $\beta_{GSO}$  – известные углы полураствора антенны ГСО в ГП и ВП.

Если по результатам перечисленных условий объект оказался в пределах зоны обзора, принимается, что он обнаружен, в противном случае принимается, что объект не обнаружен.

Проверка нахождения объекта в зоне обзора ГСО в ВП и ГП происходит по каждому моделируемому объекту до тех пор, пока объект не будет обнаружен или не окажется позади зоны обзора ГСО.

На этом моделирование условий попадания объекта в сектор обзора ГСО закончено. Одновременно с проверкой попадания объекта в сектор обзора ГСО проверяется обнаружение объекта ГБО.

### ***Моделирование обнаружения объекта ГБО***

Условие попадания в зону обзора ГБО по дальности определяется выражением:

$$\sqrt{(x_o - x_a)^2 + (y_o - y_a)^2 + (z_o - z_a)^2} \leq R_{GBO},$$

где  $R_{GBO}$  – дальность обнаружения ГБО.

После выполнения условия по дальности осуществляется проверка выполнения условий попадания в сектор зоны обзора ГБО в ГП и ВП:

$$|\alpha_o| \leq \alpha_{GBO};$$

$$|\beta_o| \leq \beta_{GBO}.$$

где  $\alpha_{GBO}$ ,  $\beta_{GBO}$  – известные углы полураствора антенны ГСО в ГП и ВП.

На этом моделирование условий попадания объекта в сектор обзора ГБО закончен. Если по результатам перечисленных условий объект оказался в пределах зоны обзора, принимается, что он обнаружен, в противном случае принимается, что объект не обнаружен. Проверка нахождения объекта в зоне обзора ГБО в ВП и ГП происходит по каждому моделируемому объекту до тех пор, пока объект не будет обнаружен или не окажется позади зоны обзора ГБО.

### ***Моделирование обнаружения объекта гидробатическим АНПА***

По сравнению с традиционным АНПА отличие моделирования обнаружения объекта состоит в том, что в традиционном АНПА корпус АНПА движется поступательно и не вращается по крену, зоны обзора ГСО и ГБО также не вращаются вокруг оси, совпадающей с направлением движения АНПА. В связи с этим изменится моделирование обнаружения объектов поисковыми средствами гидробатическими АНПА.

### **Моделирование обнаружения объекта ГСО**

При оценке попадания объекта с координатами  $(x_o, y_o, z_o)$  в зоны обзора ГСО и ГБО перейдем из системы координат, связанной с АНПА, в систему координат, связанную с зоной обзора ГСО.

В результате перехода пересчет новых координат  $(x'_o, y'_o, z'_o)$  положения объекта в системе координат, связанной с постоянно вращающимся вместе с АНПА зоной обзора ГСО, происходит с использованием выражений:

$$\begin{aligned}x'_o &= x_o \cos \theta - y_o \sin \theta; \\y'_o &= x_o \sin \theta + y_o \cos \theta; \\z'_o &= z_o,\end{aligned}$$

где  $\theta$  – угол крена АНПА.

Условие обнаружения объекта ГСО анализировалось путем оценки попадания объекта в сектор обзора ГСО в ГП и ВП.

### **Моделирование обнаружения объекта ГСО**

Попадание объекта в круговую зону, ограниченную дальностью обнаружения, определяется выражением:

$$\sqrt{(x'_o - x_a)^2 + (y'_o - y_a)^2 + (z'_o - z_a)^2} \leq R_{GSO}.$$

По результатам выполнения этого условия осуществляется переход к проверке следующего условия – попадания объекта в пределы сектора обзора по углам в горизонтальной плоскости.

Для этого предполагается, что заранее известны углы раскрытия антенны в ГП, поэтому для проверки условия остается вычислить угол положения объекта в ГП:

$$\alpha'_o = \arctan \frac{(x'_o - x_a)}{(z'_o - z_a)}.$$

Оценка того, что объект по углу в ГП находится в пределах сектора обзора ГСО:

$$|\alpha'_o| \leq \alpha_{GSO}.$$

Аналогичным образом определяется попадание объекта в сектор обзора ГСО в вертикальной плоскости:

$$\beta'_o = \arctan \frac{(y'_o - y_a)}{(z'_o - z_a)}.$$

Предполагается, что заранее известны углы раскрытия сектора обзора ГСО в ГП, поэтому для проверки условия остается вычислить угол положения объекта в ГП:

$$|\beta'_o| \leq \beta_{GSO}.$$

При этом для совершения вращений корпуса АНПА по крену ориентация положения сектора обзора ГСО постоянно меняется, вследствие чего меняются и координаты положения объекта относительно сектора обзора: относительно неподвижного сектора обзора объекты постоянно вращаются.

### **Моделирование обнаружения объекта ГБО**

Определение условия попадания объекта в зону обзора ГБО связано с особенностью ГБО: в отличие от вперёдсмотрящего ГСО сектор обзора ГБО развернут вокруг оси  $Oy$  на  $90^\circ$ .

По дальности оценка попадания объекта в пределы сектора обзора происходит в два этапа:

– сначала определяется попадание объекта в пределы зоны обзора по дистанции сближения – это попадание в полосу, связанную с шириной сектора обзора ГБО, определяемое выражением

$$\Delta z_{GBO} = R_{GBO} \cdot \sin \alpha ,$$

где  $\Delta z_{GBO}$  – полуширина полосы обзора ГБО.

Условие попадания объекта в полосу моделируется выражением:

$$z_a - \Delta z_{GBO} \leq z_{GBO} \leq z_a + \Delta z_{GBO} .$$

Условие попадание объекта в пределы дальности сектора обнаружения определяется выражением:

$$\sqrt{(x'_o - x_a)^2 + (y'_o - y_a)^2 + (z'_o - z_a)^2} \leq R_{GBO} .$$

По результатам выполнения этих двух условий происходит проверка выполнения условий попадания объекта в сектор обзора ГБО.

Поскольку АНПА вращается по крену, то и зона обзора ГБО вращается вместе с АНПА. Поэтому пересчет координат объекта при переходе от системы координат, связанной с АНПА, в локальную, связанную с сектором обзора ГБО, происходит в два этапа.

На первом этапе оценивается положение объекта при развороте антенны на  $90^\circ$  вокруг оси  $Oy$ ; второе – оценивается положение объекта в секторе обзора, вращающегося синхронно с вращением корпуса АНПА по крену.

Для перехода в систему координат, связанную с зоной обзора, развернутой на  $90^\circ$  относительно вертикальной оси  $Oy$ , используем выражения:

$$\begin{aligned} x'_o &= z_o \sin \frac{\pi}{2} + x_o \cos \frac{\pi}{2}; \\ z'_o &= z_o \cos \frac{\pi}{2} - x_o \sin \frac{\pi}{2}; \\ y'_o &= y_o. \end{aligned}$$

Угол положения объекта в секторе обзора ГБО в ГП определяется выражением:

$$\alpha'_o = \arctan \left( \frac{z'_o - z_a}{x'_o - x_a} \right) .$$

Определение координат положения объекта в системе координат, связанной с сектором обзора ГБО и вращающейся синхронно с вращением корпуса АНПА по крену, определяется выражениями:

$$\begin{aligned} x''_o &= x'_o \cos \theta - y'_o \sin \theta; \\ y''_o &= x'_o \sin \theta + y'_o \cos \theta; \\ z''_o &= z'_o. \end{aligned}$$

Определение угла положения объекта в ВП сектора обзора ГБО:

$$\beta'_o = \arctan \left( \frac{y''_o - y_a}{x''_o - x_a} \right) .$$

Проверка выполнения условий попадания в сектор обзора ГБО:

в ГП:

$$|\alpha'_o| \leq \alpha_{GBO};$$

в ВП:

$$|\beta'_o| \leq \beta_{GBO} .$$

Если условия выполняются, то объект находится в пределах зоны обзора ГБО, и принимается, что объект обнаружен.

В случае обнаружения объекта происходит его регистрация традиционным и гидроакустическим АНПА.

Проверка приведенных выше условий по каждому моделируемому объекту происходит до тех пор, пока объект не окажется позади зон обзора ГСО и ГБО.

**Формирование момента появления объекта**

Поскольку по замыслу задачи появление объекта заранее непредсказуемо, на старте численного эксперимента задается пороговое число  $P_1$ , определяемое частотой появления объекта.

Случайный момент времени появления объекта определяется по результатам сравнение случайного числа  $\xi_1$ , разыгранного равномерно из диапазона  $[0;1]$ , с заданным порогом  $P_1$ . Если выполняется условие  $\xi_1 > P_1$ , то принимается, что появился объект, в противном случае считается, что объект не появился.

### *Алгоритм функционирования АНПА*

В стартовый момент времени моделирования происходит задание начального положения и параметров АНПА, параметров поисковых средств АНПА, положения объекта в случае его появления.

Разыгрываются случайным образом равномерно: момент появления объекта, его начальные координаты, направление движения объекта и скорость его движения.

В ходе проведения численного эксперимента при моделировании положения АНПА и объектов переходим к относительному движению объектов, для чего АНПА считаем неподвижным, а результирующую скорость вдоль оси  $Oz$  приписываем объекту, движущемуся навстречу АНПА.

В каждом такте имитации осуществлялись:

- расчет текущих координат АНПА;
- пересчет положения имитируемых объектов относительно АНПА с учетом относительной скорости;
- положение и ориентация зон обзора поисковых средств;
- анализ попадания объекта в пределы зон обзора поисковых средств ГСО и ГБО.

Если объект обнаружен, то испытание считается результативным, в противном случае – нерезультативным.

Условиями окончания испытания являются:

- положение объекта в пределах зоны обзора поисковых средств;
- выход объекта за пределы зоны подводного наблюдения.

В процессе проведения серии испытаний происходит накопление количества результативных испытаний, после чего рассчитывается вероятность обнаружения  $P_{obn}$  объекта как отношение количества результативных испытаний  $N_0$  к общему количеству испытаний  $N$  в серии:

$$P_{obn} == \frac{N_0}{N}.$$

Количество имитируемых объектов в серии составляло 1000.

По результатам многочисленных натурных испытаний в лабораторных и реальных условиях проведена верификация разработанной математической модели.

Разработанная имитационная модель оценки эффективности подводного наблюдения АНПА с реализацией алгоритма расчета вероятности обнаружения объектов программно реализована для проведения численных экспериментов.

Внешний вид главного окна программы представлен на рис. 4.

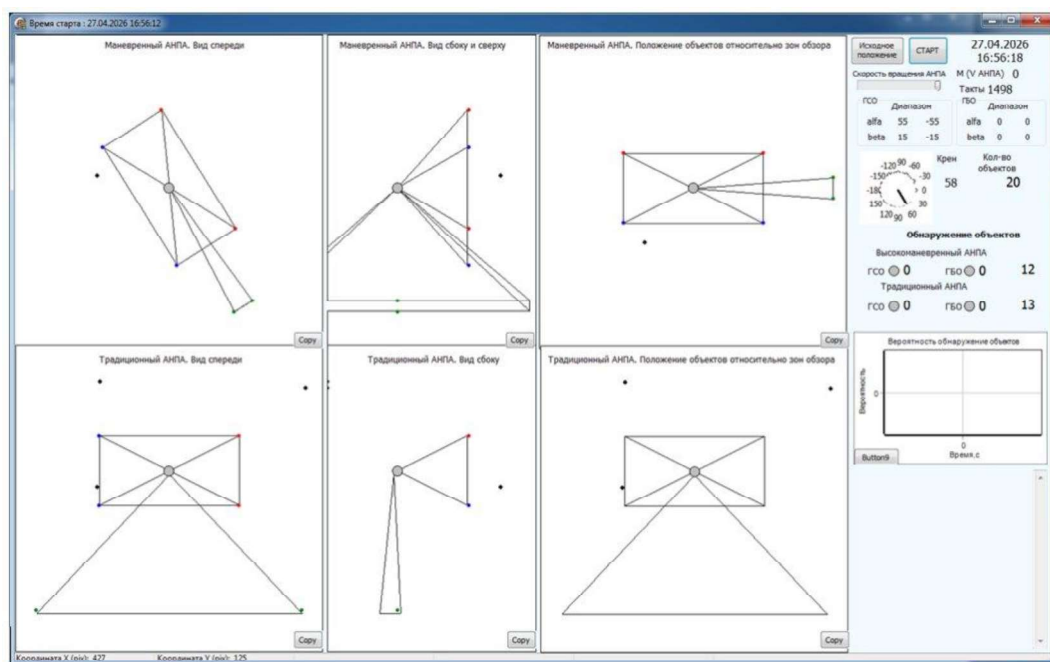


Рис. 4. Внешний вид главного окна программы

На рис. 4 в верхнем ряду отображаются текущие положения зон обзора ГСО и ГБО гидробатического АНПА, в нижнем ряду – традиционного АНПА. Справа приведен вид спереди на АНПА, в центре – вид сбоку, слева – текущее положение объектов относительно зон обзора ГСО и ГБО; для традиционного АНПА этот вид совпадает с видом спереди на АНПА. Появление объектов происходит синхронно в верхней и нижней частях экрана. В правой части главного окна программы приведены характеристики секторов обзора ГСО и ГБО, на циферблате – текущий крен, под циферблатом – результаты накопления обнаруженных объектов.

### 3. Результаты численного эксперимента

Цель численного эксперимента – оценка влияния скорости поступательного движения гидробатического АНПА и скорости вращения гидробатического АНПА по крену на вероятность обнаружения.

*Для проведения численного эксперимента заданы следующие исходные данные:*

- положение АНПА с указанием курса  $90^\circ$ , скорости 4 уз, координат  $(x_a, y_a) = (0, 0)$  и глубины  $z_a = 0$ ;
- дальность ГСО 500 м;
- полурастворы сектора обзора ГСО в ГП и ВП:  $60^\circ \times 30^\circ$ ;
- дальность ГБО 500 м;
- полурастворы сектора обзора ГБО в ГП и ВП:  $70^\circ \times 4^\circ$ .

Курс и скорость объектов разыгрывались равновероятно из заданных диапазонов: курс  $[0; \pm 30^\circ]$ , скорость  $[1; 10]$  уз. Также разыгрывались: момент появления объекта на одной и той же дистанции 800 м, положение объекта по глубине и по отстоянию от АНПА по горизонтали в диапазоне удвоенной дальности обнаружения ГБО, равной 440 м.

В процессе проведения эксперимента независимо рассмотрены синхронные движения традиционного АНПА и гидробатического АНПА. Исследования проходили в два этапа. На первом этапе рассмотрено изменение скорости движения АНПА, на втором этапе – изменение скорости вращения АНПА по крену.

**На первом этапе** оценки влияния скорости движения АНПА на вероятность обнаружения объекта – скорость менялась в диапазоне от 0,4 до 12,0 уз. Результаты моделирования приведены на рис. 5, на котором по горизонтальной оси отложена линейная скорость движения АНПА, по вертикальной оси – вероятность обнаружения объектов.

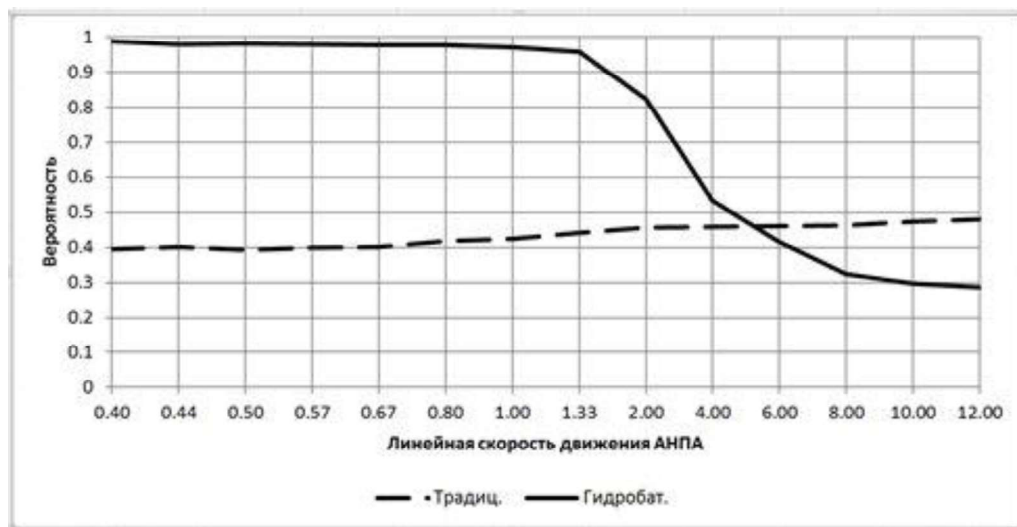


Рис. 5. Влияние скорости поступательного движения АНПА на вероятность обнаружения

Результаты расчетов вероятности обнаружения показали, что при относительной скорости движения объектов до 4 уз целесообразнее использовать гидробатические АНПА, однако при дальнейшем увеличении скорости объектов происходит увеличение шага вращения, в результате чего не все объекты оказываются в секторе обзора ГБО. Кроме того, увеличение поступательной скорости ограничено необходимостью получения отраженного от объекта сигнала, находящегося в пределах дальности обнаружения ГБО. С другой стороны – при широкой полосе обзора ГБО целесообразно следующий виток осуществлять со смещением, равным ширине полосы обзора ГБО  $\Delta z$ .

**На втором этапе** исследований менялась скорость вращения гидробатического АНПА по крену в диапазоне от 0,1%/такт до 3,0 %/такт. Результаты моделирования приведены на рис. 6.

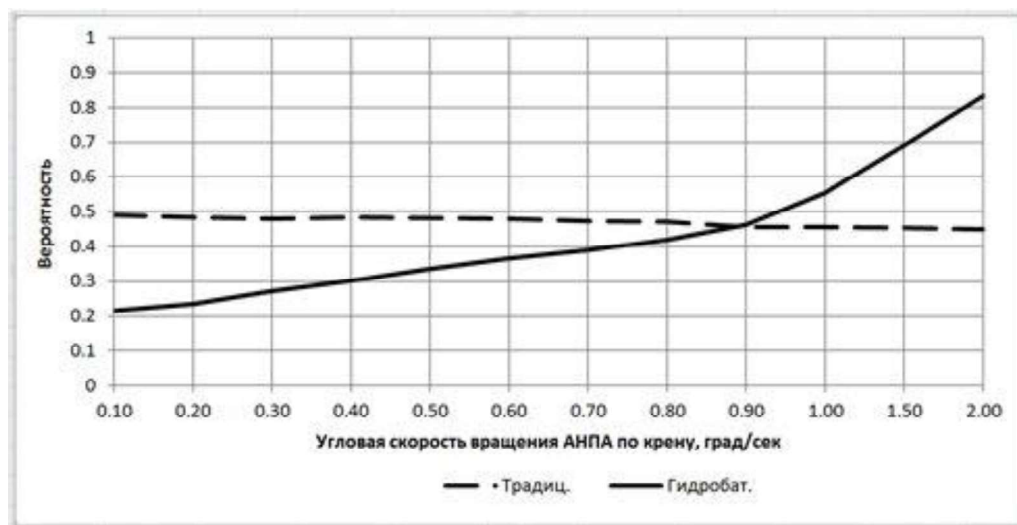


Рис. 6. Влияние скорости вращения АНПА по крену на вероятность обнаружения

Результаты расчетов вероятности обнаружения показали, что при скорости вращения АНПА по крену до  $0,9^\circ$  использовать гидробатические АНПА нецелесообразно, так как возникают большие пропуски в пространстве, не заполненном секторами обзора ГСО и ГБО. При увеличении скорости вращения АНПА вероятность обнаружения повышается и достигает 0,84.

Таким образом возникает оптимизационная задача выбора характеристик поисковых средств, параметров поступательного движения АНПА и параметров вращения АНПА по крену, обеспечивающих наибольшую вероятность обнаружения объектов гидробатическим АНПА.

### **Заключение**

Для оценки эффективности перспективных гидробатических АНПА, способных маневрировать по крену/дифференту/рысканию «на пяточке» за ограниченное время, разработана имитационная модель оценки эффективности поиска малоразмерных объектов при проведении подводного наблюдения АНПА в морской акватории. Критерием эффективности выбрана вероятность обнаружения. Разработанная имитационная модель воспроизводит движение АНПА и объектов, вращение гидробатического АНПА по крену и соответствующее вращение зон обзора ГСО и ГБО, обнаружение объектов ГБО и ГСО.

По результатам моделирования и сравнительного анализа выявлены ограничения по скорости движения АНПА и скорости вращения по крену, при которых применение гидробатического АНПА становится более эффективным по сравнению с применением традиционного АНПА: превышение достигает 0,4 по вероятности обнаружения. Результаты исследований позволят разработчикам гидробатических АНПА иметь ориентиры при конструировании и компоновке, а при ведении подводного наблюдения – выборе линейной скорости движения АНПА и скорости вращения АНПА по крену с учетом особенностей функционирования поисковых средств – ГСО и ГБО.

### **Литература**

1. Система обнаружения подводных пловцов. – URL: <https://trancons.ru/products/DDS/SOPP-K> (дата обращения 01.05.2023).
2. Методы и средства защиты от подводных диверсантов. – URL: <http://www.akvilona.ru/news/anti-frogman.htm> (дата обращения 01.05.2023).
3. **Маркович И.И.** Многоканальная система цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов перспективного комплекса проведения поисковоспасательных работ // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2006. – №3 (58). – С. 174-179.
4. **Боженев Ю.А.** Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2011. – Т. 4. – № 1, – С. 47-68.
5. **Каевицер В.И.** Дистанционное зондирование морского дна акустическими сигналами с линейной частотной модуляцией / В.И. Каевицер, В.М. Разманов, А.П. Кривцов, И.В. Смольянинов, С.А. Долотов // Радиотехника. – 2008. – № 8. – С. 35-42.
6. **Воронин В.А.** Использование гидролокатора бокового обзора со сложным сигналом для экологического мониторинга дна и инженерных подводных сооружений / В.А. Воронин, А.В. Ходотов, А.В. Скарня, С.П. Тарасов, В.Т. Трусилов // Известия ТРТУ. – 2004. – № 5 (40). – С. 80- 82.

7. **Волощенко А.П.** Южный федеральный университет Применение гидролокатора бокового обзора для обнаружения рыболовных сетей // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2021. – № 3. – С.10-16.
8. **Daniel A Duecker; Christian Horst; Edwin Kreuze** From Aerobatics to Hydrobatics: Agile Trajectory Planning and Tracking for Micro Underwater Robots // 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 27 September 2021 - 01 October 2021. Prague, Czech Republic. DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9636154.
9. **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.
10. **Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016). Материалы 9-ой Мультиконференции по проблемам управления. Председатель президиума мультиконференции В.Г. Пешехонов. 2016. С. 205-209.