

УДК 681.5:532

© Е.И.Якушенко<sup>1</sup>, Ю.В.Гурьев<sup>1</sup>, И.В.Ткаченко<sup>2</sup>, 2012

<sup>1</sup>Военно-морской инженерный институт (филиал) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
uvgur@mail.ru

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Статья посвящена междисциплинарному направлению комплексного обеспечения скрытности морских подводных объектов. Предложенные решения состоят в контроле и управлении физическими полями объекта с помощью компьютерного бортового комплекса. Дано описание созданного прототипа – электронного макета, его математическое и программное обеспечение. Результаты имитационного моделирования продемонстрировали эффективное снижение вероятности обнаружения подводных объектов группой наблюдателей, осуществляющих поиск объектов по разнородным физическим полям.

**Ключевые слова:** внутренние волны, гидродинамические следы и аномалии, информационные технологии, математическое моделирование, морской подводный объект, физические поля, управление физическими полями.

Одной из важнейших научно-технических проблем, стоящих перед флотами держав с высоким уровнем развития технологий, является обеспечение скрытности и защиты морских подводных объектов (МПО) по физическим полям. Актуальность этой задачи подтверждается практическим опытом и кратко может быть выражена так: «обнаружен – уничтожен».

Для обеспечения скрытности используются два взаимодополняющих подхода. Первый возник практически одновременно с появлением подводных объектов и состоит в принятии проектно-конструкторских решений, направленных на снижение уровня генерируемых физических полей техническими средствами морского подводного объекта (МПО). Многолетние усилия ученых, в первую очередь Академии наук, инженеров и проектантов обеспечили определенные результаты по снижению заметности современных подводных объектов [1]. По отдельным физическим полям, например гидроакустическому, удалось достичь уровней, близких к фоновым значениям.

Однако подводные объекты создают не только гидроакустическое, но и десятки других физических полей (известно около 40 их разновидностей). По некоторым из них, например гидрофизическим, конструктивные решения не обеспечивают заметного снижения возмущений, вызванных самим фактом движения огромного водоизмещающего объекта в морской неоднородной среде.

Для борьбы с возмущениями не только этих, но и других физических полей, эффективен второй путь обеспечения скрытности, состоящий в контроле и управлении этими полями непосредственно в процессе эксплуатации МПО. При его реализации повышение скрытности достигается управлением параметрами движения и режимами работы технических средств, направленным на снижение уровня физических полей и, как следствие, минимизацией вероятности обнаружения.

Практическим инструментом реализации нового подхода должен стать бортовой информационно-измерительный комплекс контроля и управления физическими полями

(БИИКК ФП) МПО. Целью такого управления является заметное ослабление или исключение демаскирующих признаков, обусловленных физическими полями. Для достижения цели комплекс осуществляет автоматическую выработку в режиме реального времени рекомендаций по выбору маршрута и параметров движения, а также работы технических средств объекта в условиях реальной изменяющейся внешней, гидрометеорологической и гидрофизической обстановки.

Сложность научных и технологических задач, стоящих перед разработчиками комплекса, предопределяет поэтапный подход к его созданию. Первым практическим шагом в этом направлении явилось создание электронного макета бортового комплекса – его виртуального прототипа, который стал компьютерным инструментом практической проверки основных идей и научно-технических положений, заложенных в проект, отработки математического и программного обеспечения будущего натурального комплекса.

Работа по созданию электронного макета комплекса была начата в Военно-морском инженерном институте в 2008 г. в тесном сотрудничестве с ведущими учреждениями Российской академии наук и профильными отраслевыми институтами страны, среди которых Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова, Институт машиноведения им. А.А.Благонравова, Институт машиноведения УрО РАН, Институт проблем машиноведения (СПб), Институт Геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского, ФГУП ЦНИИ «Электроприбор», ФГУП ЦНИИ им. А.Н.Крылова, ГосНИИАС и 1 ЦНИИ МО РФ.

В результате совместных усилий было разработано математическое и программное обеспечение, имитирующее работу всех основных элементов натурального бортового комплекса.

Из всего многообразия физических полей, создаваемых МПО, в рабочую версию электронного макета были включены каналы управления по гидроакустическому (ГАП), магнитному (МП), гидрофизическому (ГФП) и некоторым другим полям. Остановимся подробнее на моделях каналов управления физическими полями и проблемах их дальнейшего развития.

Канал управления ГАП использует математическую модель первичного гидроакустического поля (ПГАП), построенную на объединении двух регрессивных моделей, одна из которых описывает распространение высоко-, а другая низкочастотных акустических возмущений. В основе самих регрессивных моделей лежат результаты статистической обработки экспериментальных данных. Для использования модели ПГАП необходимо задавать спектр МПО для различных режимов движения, в первую очередь при различных скоростях корабля. Такая модель в целом позволила описать первичное акустическое поле с точностью, достаточной для создания электронного макета бортового комплекса управления физическими полями.

Важнейшим элементом канала управления МП является математическая модель дипольного магнитного момента – основной характеристики магнитного состояния МПО. Для его расчета и анализа могут быть использованы теоретические методы, основанные на аналитическом описании полной свободной энергии монокристалла, эмпирико-эксплуатационные методы контроля магнитного состояния корпуса с помощью магнитоизмерительной аппаратуры, теоретико-статистические методы оценки магнитного состояния, основанные на моделях Вебера–Максвелла и Прейзаха, а в последнее время и численные методы.

Анализ показывает, что для электронного макета комплекса эффективным является использование моделей Вебера–Максвелла и Прейзаха, которые обеспечивают надежное прогнозирование изменения магнитного поля объекта. Однако они имеют принципиальный недостаток – описывают лишь начальный участок петли магнитного гистерезиса ферромагнетика. В результате исследований, проведенных в Военно-морском инженер-

ном институте, эти модели получили дальнейшее развитие [2]. Была предложена более полная и адекватная модель для ферромагнетиков с макроструктурой, т.е. для материалов, имеющих физическую неоднородность, характерную для корпусов МПО (магнитную анизотропию зерен, дислокации различного типа, неравновесные точечные дефекты и включения различного химического состава, внутренние напряжения и т.д.). В новой модели получены аналитические выражения замкнутой петли магнитного гистерезиса при статическом намагничивании и размагничивании

$$J_{11} = \frac{2}{3} mn_0 \frac{X}{D}; \quad J_{12} = mn_0 \left[ \frac{2}{3} \frac{X}{D} + \left( 1 - \frac{L^2}{X^2} \right) \left( \sqrt{1 - \frac{L^2}{X^2}} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{X^2}{D^2} - \frac{L^2}{D^2}} \right) \right]$$

$$J_{13} = mn_0 \left[ \frac{1}{3} \frac{X}{D} + \frac{1}{2} - \frac{1}{6} \frac{D^2}{X^2} + \frac{(D^2 - L^2)^{3/2}}{6X^2D} - \frac{\sqrt{X^2 - L^2}}{6X^2D} (2X^2 - 3XD + L^2) \right]$$

$$J_{21} = mn_0 \left[ \frac{2}{3} \frac{X}{D} - \frac{1}{6X^2D} (2X^2 - D^2 + X \cos \alpha_0) \sqrt{X^2 + D^2 + 2DX \cos \alpha_0} + \frac{1}{2} \frac{X + D \cos \alpha_0}{\sqrt{X^2 + D^2 + 2DX \cos \alpha_0}} (\cos \alpha_0 - \cos \alpha_1) + \frac{1}{6X^2D} (2X^2 - D^2 + DX \cos \alpha_1) \sqrt{X^2 + D^2 + 2DX \cos \alpha_1} \right]$$

$$X = \mu_0 H, \quad L = [m, D],$$

$$\cos \alpha_0 = \frac{1}{DX} \left( \sqrt{(D^2 - L^2)(X^2 - L^2)} - L^2 \right), \quad \cos \alpha_1 = -\frac{1}{DX} \left( \sqrt{(D^2 - L^2)(X^2 - L^2)} + L^2 \right),$$

здесь  $J_{ij}$  – намагниченность на различных интервалах петли гистерезиса,  $m$  – модуль вектора магнитного момента молекул ферромагнитного тела,  $n_0$  – число молекул в единице объема,  $H$  – модуль вектора напряженности магнитного поля,  $\mu_0$  – постоянная внешнего магнитного поля,  $D$  – упругая сила.

Лабораторные испытания подтвердили достоверность получаемых с помощью этой модели результатов, что, в частности, демонстрирует сравнение экспериментально построенной петли магнитного гистерезиса с результатами расчетов по приведенным аналитическим зависимостям для двух марок сталей, представленное на рис.1.

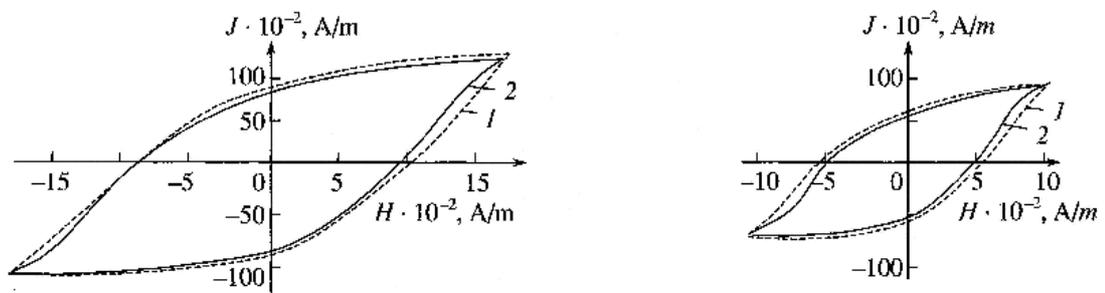


Рис.1. Экспериментальные (1) и расчетные (2) кривые намагничивания для двух марок стали: АК-29 и АК-32 (левый и правый графики соответственно).

Использование этой модели в бортовом комплексе обеспечивает прогноз магнитного состояния объекта в процессе плавания при воздействии внешних факторов (маг-

нитного поля Земли, гидростатического давления), геометрических размеров, параметров движения и режимов работы технических средств. По расчетному значению дипольного магнитного момента определяются дальность и вероятность обнаружения с учетом нахождения сил и средств наблюдения.

При своем движении в натуральных условиях МПО создает целую систему различных возмущений гидрофизической природы, которые объединяют общим термином «вызванные гидрофизические поля». При этом основные демаскирующие признаки создают такие гидрофизические процессы, как внутренние волны, возникающие при взаимодействии объекта с природным вертикальным скачком плотности – пикноклином, изменение естественных значений параметров турбулентности морской среды и вихревые структуры, образующиеся за корпусом и органами управления движением.

Трудность их моделирования связана с необходимостью адекватного учета пространственно-временной неоднородности различных полей морской среды. В противном случае многие важные демаскирующие факторы, например внутренние волны, не будут учитываться. С учетом сказанного для моделирования вызванных гидрофизических полей возможно использование либо полуэмпирических моделей, основанных на статистической обработке данных натуральных наблюдений, либо моделей, базирующихся на дифференциальных уравнениях турбулентных течений.

В уже созданном электронном макете бортового комплекса использован первый подход. Для моделирования возмущений (аномалий) используются статистические модели в виде регрессивных соотношений, позволяющие определить параметры аномалий в зависимости от гидрофизических условий (стратификация поля плотности), скорости, глубины погружения и размеров объекта. Главным их практическим преимуществом является простота при обеспечении физически непротиворечивых результатов. Однако построенные на экспериментальных данных, они не имеют серьезного теоретического обоснования и не описывают всего многообразия практически важных гидрофизических условий.

Для совершенствования этих моделей необходимо получить научные данные о гидрофизических процессах, происходящих в натуральных условиях. Для получения такой информации в ВМИИ используются методы компьютерного моделирования турбулентных течений стратифицированной жидкости. Для решения уравнений Рейнольдса и уравнений метода крупных вихрей, описывающих такие течения, применяются как лицензионные программы *Fluent*, так и программы, разработанные сотрудниками института [3]. Расчеты выполняются на высокопроизводительном вычислительном кластере ВМИИ.

Компьютерному моделированию таких течений предшествовало тестирование предложенных моделей и компьютерных программ. Адекватность моделирования подтверждается удовлетворительным согласованием численных результатов с данными физических экспериментов по измерению гидродинамических сил и структуры течений за телами простейшей формы в стратифицированной среде [4, 5]. Так расчеты гидрофизических полей за шаром, движущимся внутри пикноклина, показали, что непосредственно за телом формируется стационарная волна, вызванная вытесняющим воздействием самого тела и влиянием его устойчивых вихревых структур. Далее вниз по потоку развиваются нестационарные процессы взаимодействия вихрей, а еще ниже происходит вырождение крупных вихрей и формирование блинообразных турбулентных пятен. Полученные результаты соответствуют структуре глубинного кильватерного следа за шаром в стратифицированной среде, экспериментально установленной сотрудниками Института прикладной физики РАН.

Эти и другие тестовые результаты, подтвердившие адекватность используемых моделей, позволили перейти к исследованию гидрофизических процессов, возникающих при движении объектов более сложной геометрии. Численное моделирование движения эллипсоида внутри вертикального слоя стратифицированной жидкости показало, что и в

этом случае внутренние волны быстро затухают и основную роль играют вихревые процессы, проявляющиеся, в том числе, и в турбулентном перемешивании. Это приводит к отклонению параметров турбулентности от их фоновых значений. Однако силы Архимеда, действующие на жидкие частицы в стратифицированной по плотности среде, демпфируют турбулентные пульсации.

При движении вблизи пикноклина на малых скоростях в нем возникают устойчивые внутренние волны, которые при небольшой глубине его залегания могут вызвать возмущения на свободной поверхности моря, например в форме сликов.

Существенное влияние на заметность МПО могут оказать образующиеся за ним вихревые структуры, которые при определенных условиях всплывают к свободной поверхности и вызывают на ней возмущения, поддающиеся регистрации. Были проведены численные исследования влияния расположения объекта и его органов управления относительно пикноклина. В результате было установлено, что поведение вихревого следа существенно зависит от расположения тела относительно пикноклина.

На рис.2 представлена визуализация развития вихревого следа за крылом, моделирующим руль МПО. Видно, что при расположении крыла над пикноклином наблюдается всплытие следа к свободной поверхности, а при нахождении крыла под пикноклином последний, выполняя роль экрана, препятствует подъему следа вверх.

Аналогичное поведение отмечается и для вихревого следа за эллипсоидом. На рис.3 просматривается движение этого следа к свободной поверхности при нахождении тела над пикноклином. Вместе с тем при его движении под пикноклином могут возникнуть внутренние волны, демаскирующие при определенных условиях объект.

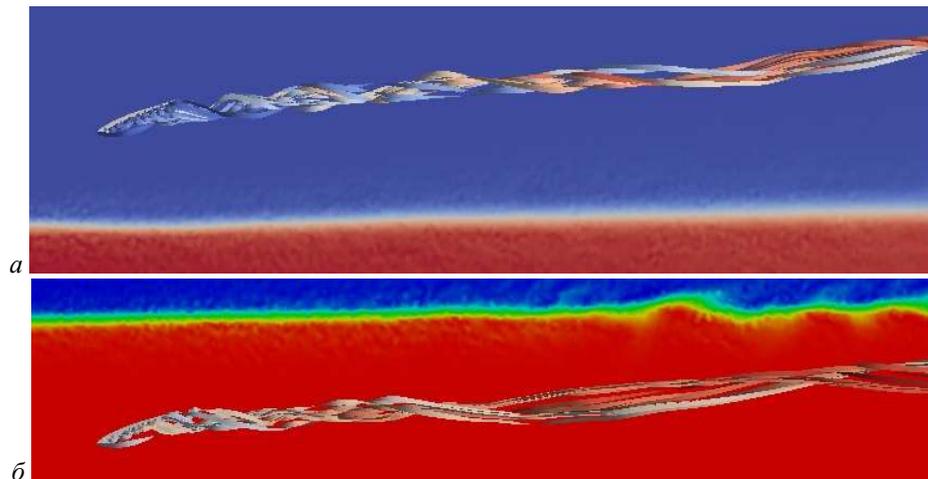


Рис.2. Взаимодействие вихревого следа крыла с пикноклином.

*а* – всплытие вихревого следа при движении крыла над пикноклином; *б* – экранирование пикноклином вихревого следа.



Рис.3. Всплытие следа за корпусом при движении над пикноклином при числе Фруда  $Fr = \frac{V_0}{\sqrt{gL}} = 0.075$

( $V_0$  – скорость движения,  $L$  – характерный размер корпуса).

Результаты тестирования и вычислительных экспериментов по исследованию гидрофизических полей позволяют сделать следующие выводы:

– разработанные математические модели и компьютерные программы обеспечивают адекватное прогнозирование ГФП, создаваемых движением МПО в натуральных условиях;

– параметры гидрофизических процессов, непосредственно влияющие на скрытность МПО, являются сложными функциями характеристик морской среды и условий движения объекта;

– используемые в электронном макете БИКК ФП МПО приближенные математические модели гидрофизических полей требуют существенного усовершенствования на основе обработки и анализа результатов серийных вычислительных экспериментов с привлечением результатов натуральных и модельных экспериментов.

Математическое и программное обеспечение подкомплекса анализа обстановки и выработки рекомендаций по повышению скрытности создавалось совместно Институтом проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН и Военно-морским инженерным институтом при ведущей роли академического института. Этот подкомплекс позволяет выполнить расчет параметров траектории и режимов работы технических средств МПО, оптимизированных по комплексному критерию обнаружения по нескольким физическим полям.

В результате электронный макет бортового комплекса впервые обеспечил информационную поддержку принятия решения по управлению МПО в режиме реального времени, оперативно реагируя на изменение гидрофизической, гидрологической и метеорологической обстановки.

Электронный макет позволяет решать несколько задач, главной из которых является расчет оптимальной (по комплексному критерию) траектории движения МПО при наличии в районе развертывания нескольких наблюдателей. Имеется возможность получения различных траекторий, оптимизированных по определенным критериям или их значениям, например для разных значений длины траектории. Выполненные исследования показали, что в ряде случаев даже незначительное увеличение ограничений на эту длину может привести к заметному снижению вероятности обнаружения.

Математическое и программное обеспечение макета бортового комплекса позволяет рассчитать вероятность обнаружения МПО отдельно по гидроакустическому, магнитному и гидрофизическому полю и ее комплексное значение с представлением полученных данных на отдельных участках и всей траектории в целом.

Проведенные исследования подтвердили принципиальную возможность создания натурального бортового комплекса контроля и управления физическими полями МПО, решающего задачу формирования научно обоснованных рекомендаций по выбору траектории по комплексному критерию обнаружения по нескольким физическим полям.

## Литература

1. Лавёров Н.П., Саркисов А.А. Подводный флот: вклад российской науки // Вестник РАН. 2006. Т.76, № 8. С.737–746.
2. Якушенко Е.И. Модель магнитоупругого гистерезиса ферромагнитных тел сложной формы и ее применение в бортовом информационно-измерительном комплексе контроля уровней физических полей подводных лодок // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 4. С.76–85.
3. Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В. Компьютерные технологии в корабельной гидродинамике. Монография. СПб.: Военно-морской инженерный институт, 2010.
4. Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В. Моделирование обтекания тел вращения потоком стратифицированной жидкости на основе метода крупных вихрей // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2008. № 1. СПб.: Наука, 208. С.80–87.
5. Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В., Якушенко Е.И. Влияние жидких границ на обтекание крыла малого удлинения // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 6.

Статья поступила в редакцию 03.02.2012 г.

