

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ МОРСКИХ СУДОВ И ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

SOME PROBLEMS OF MODELING THE DEMAGNETIZATION PROCESSES OF SHIPS AND SUBMARINES

I. Shakhshvarova

Summary. The relevance of the problems of demagnetization of submarines and surface ships, persisting for eighty-five years to the present, is shown. The parameters determining ship magnetization, ship models used for prediction calculations and changes in this area occurring with the development of computer technology and modern software are reviewed.

Keywords: magnetic field, magnetic induction, magnetic potential, magnetic boundary element models, magnetic finite element models, empirical marine models, elongated spheroidal coordinates.

Шахсуварова Илона Витальевна

Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф.

М.А. Бонч-Бруевича

shahsuvarova.ilona@mail.ru

Аннотация. Показана актуальность задач размагничивания подводных лодок и надводных судов, сохраняющаяся в течение восьмидесяти пяти лет до настоящего времени. Рассмотрены параметры, определяющие намагниченность судна, модели судов, применяющиеся для прогнозных расчетов и изменения в этой сфере, происходящие с развитием вычислительной техники и современного программного обеспечения.

Ключевые слова: магнитное поле, магнитная индукция, магнитный потенциал, модели магнитных граничных элементов, модели магнитных конечных элементов, эмпирические модели морских судов, вытянутые сфероидальные координаты.

Проблеме размагничивания морских судов и подводных лодок уже более восьмидесяти пяти лет, но многие научно-исследовательские аспекты здесь по-прежнему имеют свою актуальность, востребованность и практическое значение. С 1936 г. в СССР начались работы по созданию эффективной системы размагничивания в Ленинградском физтехе (ЛФТИ), когда была поставлена государственная задача за пять лет закончить все работы [1]. Это известная система ЛФТИ для надводных судов и безобмоточная система для подводных лодок, которая впоследствии стала применяться и для надводных судов для еще большего уменьшения остаточного магнитного поля [1].

Подводная лодка, движущаяся по поверхности или под водой, вызывает обнаруживаемые локальные возмущения в магнитном поле Земли. Эти возмущения могут быть использованы для запуска систем оружия — мин с чувствительными магнитными взрывателями или систем обнаружения лодки.

Магнитная сигнатура судна может быть уменьшена путем генерации противодействующего магнитного поля подходящей силы и направления, если опираться на предварительные знания о магнитных свойствах судна. Поэтому важным шагом еще на этапе проектирования судна является прогнозирование его магнитной сигнатуры.

На ферромагнитную сигнатуру судна влияют два параметра — его размер и магнитная проницаемость материала, используемого в конструкции корабля или подводной лодки. Традиционно корабли и подводные лодки проектировались с соотношением длины к ширине порядка 10:1 для удовлетворения гидродинамическим требованиям [2]. Сегодня разрабатываются нетрадиционные геометрии корпусов с отношением длины к ширине 4:1 [2]. Например, с отношением длины к ширине от 5 до 10, или с отношением длины к ширине от 3 до 6 [3]. Однако это изменение соотношения длины к ширине оказывает незначительное влияние на магнитную сигнатуру при условии, что объем судна и свойства магнитного материала остаются постоянными. Это можно продемонстрировать на следующем примере. Магнитная сигнатура корабля или подводной лодки в окружающем пространстве прямо пропорциональна его дипольному моменту. Моделируя судно как правильный круговой цилиндр с магнитной проницаемостью намного больше, чем у свободного пространства ($\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ Генри/м), эквивалентный продольный магнитный дипольный момент, m_l , и поперечный момент, m_t , могут быть определены выражениями $m_l=\alpha l H_l$, $m_t=\alpha t H_t$, где α_l , α_t — продольная и поперечная магнитные поляризуемости цилиндра, а H_l и H_t — соответственно, индуцирующее поле Земли в продольном и поперечном направлениях цилиндра [4]. Значения α_l и α_t при переходе от соотношения размеров 10:1 к 4:1 меняются незначительно [5]. В предположении,

что объем судна одинаков при всех отношениях длины и ширины, изменение магнитного дипольного момента и результирующей сигнатуры дальнего поля в окружающем пространстве пренебрежимо малы. Таким образом, из приведенного примера следует, что магнитная сигнатура дальнего поля корабля или подводной лодки будет пропорционально уменьшаться с размером или объемом. В прошлом этот подход, как правило, не был приемлемым вариантом для уменьшения магнитной сигнатуры, поскольку меньший размер корабля или подводной лодки означает меньшую грузоподъемность. Однако современная тенденция строительства более быстрых надводных боевых кораблей с меньшими корпусами имеет свое дополнительное преимущество в виде меньшей магнитной сигнатуры.

Одним из геометрических параметров конструкции судна, влияющих на магнитную сигнатуру, является толщина стенок его корпуса. Для модели корпуса в виде вытянутой сферической оболочки (эллипсоид вращения или сфероид), которая обычно выбирается для математического моделирования сигнатур судов, можно показать связь между толщиной корпуса, магнитной проницаемостью и индуцированной сигнатурой, что реализуется полученными уравнениями для индуцированного продольного магнитного поля вытянутой сфероидальной оболочки [4]. В силу особенностей системы координат вытянутого сфероида, толщина корпуса будет меньше на его концах по сравнению с серединой. Параметры для расчетов были заданы следующим образом. Толщины на концах/середине (нос/поперечный размер) заданы как 0,5/3, 1/5, 1,5/8 и 2/10 см. Во всех случаях внешние размеры модельного корпуса фиксированы и составляют 100 м длина и диаметр 20 м, постоянная магнитной проницаемости $\mu' = \mu/\mu_0 = 90$ (материал — сталь). Индуцирующее поле вдоль продольной оси сфероида выбрано равным 55 мкТл, а сигнатуры рассчитаны на расстоянии 20 м непосредственно под осью сфероида. Результаты показали, что уменьшение толщины корпуса в 3–4 раза приводит к аналогичному уменьшению амплитуды магнитной сигнатуры [4].

Ферромагнитные модели кораблей и подводных лодок, которые предсказывают или воспроизводят их магнитную природу, нашли применение при разработке как наступательных, так и оборонительных военных систем с 30-х годов прошлого века до настоящего времени. Математическая основа разрабатывается в обобщенных системах координат и применяется к сферическим и вытянутым сфероидальным моделям намагниченных кораблей и подводных лодок. Исследуются преимущества и недостатки применения сложных численных методов конечных элементов и граничных элементов для прогнозирования сигнатур кораблей высокого порядка в ближнем поле, за которыми следу-

ет описание проектирования и тестирования дополнительных моделей физического масштаба (МФМ). Исследуется экстраполяция измеренных магнитных сигнатур из тестовых сред в зоны угроз с использованием полуэмпирических математических моделей, а также исследуются присущие им неустойчивости и методы управления ими. Эти методы моделирования магнитных сигнатур судов используются сегодня при разработке оптимизированных систем размагничивания. В целом подобные исследования завершаются изучением вопросов верификации и валидации магнитных моделей надводных кораблей и подводных лодок.

Из-за низких, по современным меркам, вычислительных мощностей и возможностей, существовавших в начале 1940-х годов, математические модели существенно ограничивались аналитическими формулировками и выражениями, которые были достаточно просты, чтобы их можно было оценить с помощью логарифмических линеек или механических арифмометров. Эти простые модели были сведены к предсказанию общих характеристик магнитного поля корабля на расстояниях несколько превышающих его ширину. В то время предсказание высокоточных сигнатур вблизи ферромагнитного корпуса могло быть выполнено только с помощью подробных моделей в физическом масштабе (МФМ). Были разработаны законы магнитного масштабирования и процедуры сборки моделей, а также построены крупные специализированные лаборатории магнитных испытаний, в которых можно измерять магнитные сигнатуры моделей. В послевоенные годы, в эпоху холодной войны, модели МФМ оставались основным методом прогнозирования сигнатур магнитного ближнего поля высокого разрешения корабля или подводной лодки на расстояниях значительно меньших их длины.

Современные достижения в области математического магнитного моделирования военно-морских судов отражают достижения в области компьютерных технологий. Более быстрая численная обработка привела к повышению точности аналитических моделей, позволив включить члены более высокого порядка в формулировки сложных математических рядов. С появлением высокопроизводительных компьютерных рабочих станций стало доступно использование численных моделей, основанных на методах конечных элементов (МКЭ) или граничных элементов (МГЭ). При правильном использовании аналитические и численные математические модели в сочетании с технологией МФМ могут значительно снизить затраты, время и риски, связанные с разработкой систем размагничивания подводных лодок и кораблей. Эти модели также могут быть применены для прогнозирования эффективности наступательных систем, использующих сиг-

натуры магнитного поля надводных кораблей и подводных лодок.

Математические модели можно разделить на две основные группы, называемые прямыми и обратными моделями. Прямые модели предсказывают магнитную сигнатуру судна аналитически на основе решений уравнения Лапласа или Пуассона в разделяемых системах координат, которые приближенно отражают форму корпуса судна. Более точно и опираясь на компьютерные мощности можно решать задачу с помощью численного моделирования МКЭ и МГЭ, которые используют детальную геометрию всей ферромагнитной структуры судна и свойства материалов. Эти модели могут предсказывать трехмерные сигнатуры (продольные, поперечные и вертикальные компоненты), создаваемые постоянной и индуцированной намагниченностью судна [6]. В более перспективных моделях можно учитывать магнитную широту и долготу, курс, углы продольного и поперечного наклона, а также геометрию встречи корабля с датчиком и каким-либо вооружением. Как только пространственное распределение магнитной сигнатуры будет сгенерировано и преобразовано во временное моделирование для выбранной скорости судна, можно рассчитать реакцию магнитной мины или системы подводного наблюдения. Конечно, также требуется соответствующая модель угрожающего устройства. В конечном итоге, получают следующие важные параметры: общая восприимчивость конкретного боевого корабля, класса кораблей или боевой группы к этим угрозам и преимущества уменьшения их магнитных сигнатур.

Для обратных моделей входными данными являются магнитные сигнатуры, измеренные на полномасштабных судах или с помощью МФМ и точные данные слежения, на основе которых можно реконструировать встречу судна с датчиком. Данные о магнитных полях и данные слежения объединяются для вычисления эквивалентных мощностей источников, которые затем служат входами в прямую аналитическую модель для экстраполяции сигнатур на другие геометрии датчиков и среды, отличные от исходных. Модели такого типа иногда называют полуэмпирическими, поскольку они используют измеренные данные в качестве входа для решения неизвестных параметров в системе аналитических уравнений. Важным аспектом моделирования является точное представление о влиянии систем размагничивания и снижения магнитной сигнатуры на некомпенсированные поля корабля или подводной лодки.

Основной метод активной компенсации магнитных сигнатур — это система размагничивания. Система размагничивания состоит из нескольких петель кабеля,

расположенных по всему судну, которые при воздействии при подаче соответствующего тока, как установлено во время калибровки системы, создают распределение магнитного потока, равное некомпенсированной магнитной сигнатуре, но противоположной полярности. Суперпозиция некомпенсированной или не размагниченной сигнатуры с сигнатурой калиброванных размагничивающих контуров приводит к небольшому результирующему магнитному полю.

По различным причинам моделирование магнитных сигнатур размагничивающих контуров является сложной задачей при использовании математических моделей и, в некоторых отношениях, также при использовании МФМ. Соответственно в настоящее время важным и актуальным является описание и разработка математических формулировок и методов магнитного моделирования, применимых к военным кораблям и подводным лодкам.

Установлено, что решения уравнения Лапласа в системе координат вытянутого сфероида имеют некоторые существенные преимущества при моделировании магнитного поля кораблей [6]. В обобщенной системе координат, включающей скалярные и векторные операторы, эти уравнения станут основой для получения решений уравнений Лапласа и Пуассона.

Все перечисленные трудности моделирования, отмеченные выше, значительно упрощаются в настоящее время. Современный уровень развития компьютерной техники, рост вычислительной мощности ведет к появлению и применению в моделировании задач размагничивания подводных лодок нового программного обеспечения. Известный продукт FemLab от компании COMSOL был выпущен в 1998 г. — единственный из подобных программ продукт, позволяющий непосредственно вводить уравнения с частными производными в привычной форме. И совсем уже выходит за рамки привычного то, что пользователи могут взаимно связывать любые физические явления, и разрабатывать мультифизическую модель. В настоящее время бурное развитие этого эффективного программного обеспечения привело к тому, что в 2005 г. произошло изменение его названия на COMSOL Multiphysics. В 2014 г. вышла версия COMSOL Multiphysics 5.0, а в 2021 г. — новейшая версия COMSOL Multiphysics 6.0.

Подводные лодки и корабли в значительной степени сделаны из листового металла. Это существенно осложняет моделирование с помощью стандартного конечно-элементного анализа, поскольку расчетные объемные сетки тонких протяженных структур трудно генерировать и они имеют тенденцию становиться очень большими. Приложение COMSOL Multiphysics

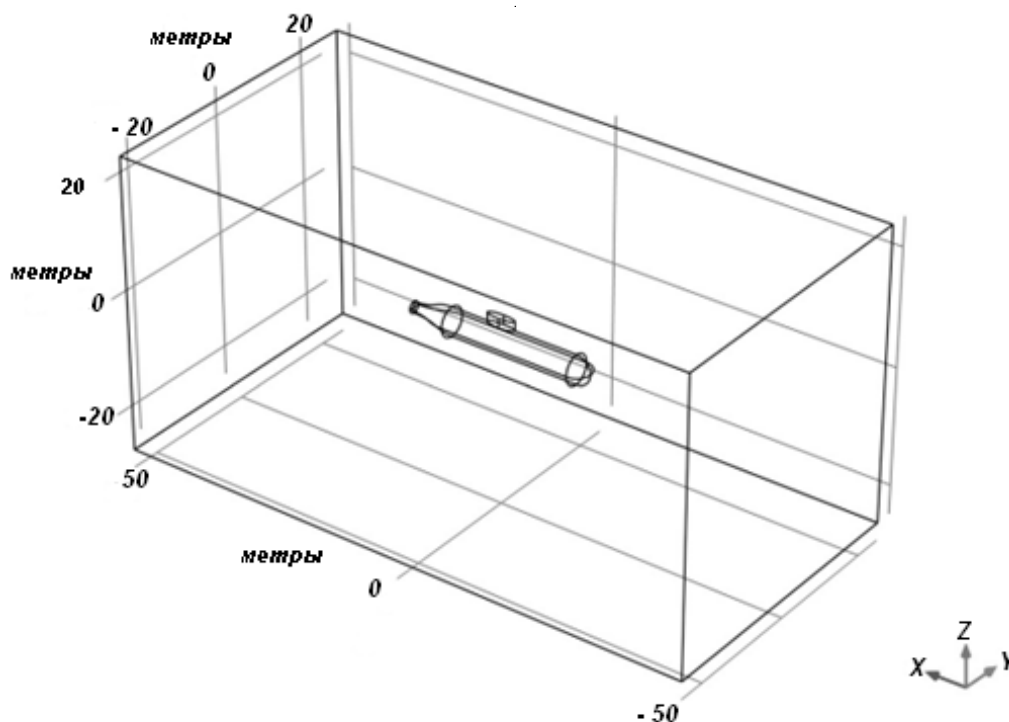


Рис. 1. Геометрия модели

6.0 предоставляет мощную технику, позволяющую решать задачу путем моделирования листового металла как двумерных граней, вложенных в объемную сетку, встроенных в трехмерную геометрию. Таким образом, необходимо и достаточно создать сравнительно недорогие двумерные сетки граней в дополнение к трехмерной сетке объема, используемой для окружающей среды. Далее тангенциальная проекция трехмерного уравнения решается на двумерной сетке.

В магнитостатических задачах, где отсутствуют токи, возможно решение задачи с использованием скалярного магнитного потенциала. COMSOL Multiphysics обеспечивает специальную технику для моделирования тонких листов материалов с высокой проницаемостью, а также показывает использование формулировок редуцированного (сниженного) поля в модуле пакета AC/DC для удобного моделирования возмущений в известном фоновом поле.

Геометрия модели показана на рисунке 1 и состоит из корпуса подводной лодки, помещенной в трехмерный бокс, моделирующий окружающее водное пространство [7]. Для предметной области рассмотрим необходимые уравнения, в которых векторы записаны жирным шрифтом. В свободной от течений области, где $\nabla \times \mathbf{H} = 0$ можно определить скалярный магнитный потенциал V_M из соотношения $\mathbf{H} = -\nabla V_M$. Это аналогично

определению электрического потенциала для статических электрических полей. Используя соотношение между плотностью магнитного потока (магнитной индукции) и магнитным полем $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$ вместе с уравнением $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ можно записать уравнение для V_M

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \nabla V_M) = 0.$$

В этой модели используем формулировку редуцированного (сниженного) поля — это означает, что решение проводим только для потенциала V_M , соответствующего сниженному (редуцированному) полю, поэтому решаемое уравнение выглядит следующим образом

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \nabla V_M + \mathbf{B}_{\text{внш}}) = 0,$$

где $\mathbf{B}_{\text{внш}}$ — известное внешнее фоновое поле, в данном случае магнитное поле Земли, заданное как 0,5 Гс или 50 мкТл.

Граничные условия устанавливаются из того, что внешние границы бокса являются изолирующими для сниженного (редуцированного) магнитного поля $\mathbf{B}_{\text{снж}}$:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}_{\text{снж}} = 0$$

К внешним объектам корпуса подводной лодки, применяется двумерная тангенциальная проекция

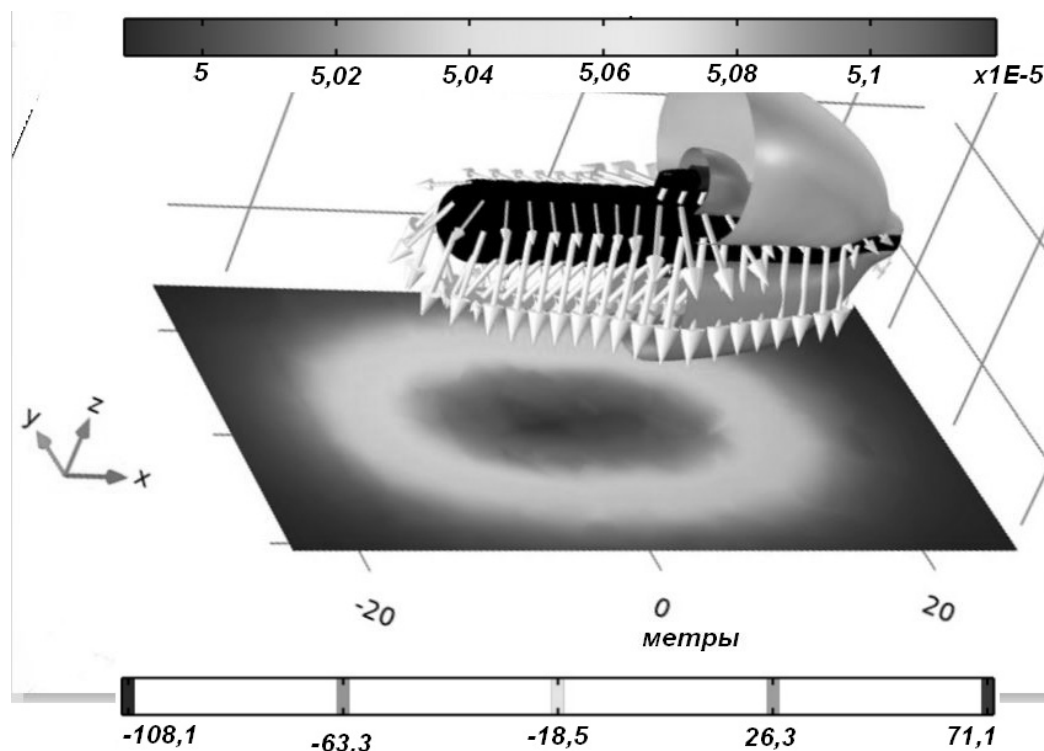


Рис. 2. Цветовой график в плоскости среза показывает: 1) общую плотность магнитного потока по верхней цветовой шкале; 2) сниженный магнитный потенциал по нижней цветовой шкале. Стрелки показывают направление и силу тангенциального магнитного поля в корпусе лодки.

уравнения трехмерной области, где толщина и проницаемость корпуса вводятся в качестве параметров. Это легко доступно в используемой формулировке в качестве экранирующего граничного условия, что полезно для моделирования высокопроницаемых тонких листов.

Соответствующие граничные условия доступны в интерфейсах пакета COMSOL Multiphysics «Электрические токи» и «Электростатика» для моделирования тонких листов с высокой проводимостью и высокой проницаемостью соответственно.

После выполнения соответствующих расчетов в пакете COMSOL Multiphysics можно получить следующие результаты для магнитной индукции под килем подводной лодки. На глубине 12 м под килем проведем горизонтальную плоскость среза, на которой видно отчетливое возмущение магнитного поля, вызванное присутствием лодки. Величину и направление тангенциального магнитного поля в корпусе судна покажем стрелками, отходящими от корпуса лодки, разной длины и густоты.

Сниженное магнитное поле визуализируется как изоуровни приведенного магнитного потенциала. Это

дает достаточно хорошую картину возмущения, вызванного присутствием подводной лодки в фоновом поле окружающего пространства. Проекция силовых линий на плоскость среза дает эллипсоидальную картину из вложенных эллипсов, границы которых соответствуют разным значениям магнитного потенциала. Максимум плотности магнитного потока (и соответствующего магнитного потенциала) находится в центре плоскости среза под килем лодки на уровне $5,12 \times 10^{-5}$ Тл

Рассмотренные в работе основные модели морских судов, используемых в задачах снижения их магнитной видимости, делятся на теоретико-расчетные, полуэмпирические и модели полного физического масштаба. В настоящее время все перечисленные модели находят свое применение в задачах снижения магнитного поля подводных лодок и надводных кораблей. Эти задачи представляются весьма актуальными в свете национальной безопасности и исследования в этой области продолжают на протяжении восьмидесяти пяти последних лет до наших дней и, несомненно, будут актуальны в будущем. Это обусловлено как развитием вычислительных мощностей компьютерных станций и соответствующего программного обеспечения, так и изменением состава конструкционных материалов проектируемых кораблей и подводных лодок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяков Б.Б. О создателях системы противоминной защиты кораблей в физико-техническом институте / *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2012, том 5, № 2, С.35–51.
2. J. Pike. Littoral Combat Ship Specifications. Military. GlobalSecurity.org. Alexandria, VA. [Электронный ресурс] URL: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/lcsspecs.htm> (дата обращения 20.01.2022).
3. Правила разработки и проведения морских операций / Российский морской регистр судоходства, Спб., 2017. 193 с.
4. J.J. Holmes, *Modeling a Ship's Ferromagnetic Signatures*, 1st edn. Morgan & Claypool Publishers, San Rafael, CA, 2007. doi:10.2200/S00092ED1V01Y200706CEM016
5. M. Fogiel (2007, Jan). Magnetic Effects of Stainless Steel. Australian Stainless Steel Development Association. Brisbane, Australia. [Электронный ресурс] URL: <https://www.assda.asn.au/technical-info/32-technical-info/answers-to-faqs/91-magnetic-effects-of-stainless-steel> (дата обращения 20.01.2022).
6. J.J. Holmes, *Exploitation of a Ship's Magnetic Field Signatures*, 1st ed. Denver, CO: Morgan & Claypool, 2006. 78 p.
7. Z. Wang, X. Li, Peng Liu, Y. Tao. Numerical analysis of submarine using a smoothed particle hydrodynamics depth integral model / *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, v. 35, № 5, P. 134–140.

© Шахсуварова Илона Витальевна (shahsuvarova.ilona@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича