



Завальнюк О. П.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ КОРПУСА СУДНА

В статье исследована возможность применения магнитометрического метода для контроля механических напряжений корпуса судна, для чего выполнен расчет магнитного поля рассеяния корпуса как ферромагнитного объекта контроля, создаваемого однородным полем Земли. При этом корпус судна представляется совокупностью поверхностных источников поля. Показано, что определенная величина магнитного поля достаточна для его регистрации магниточувствительными элементами.

Ключевые слова: корпус судна, ферромагнитный объект контроля, механические напряжения, магнитное поле рассеяния.

1. Введение

В процессе грузовых и балластных операций на тихой воде, а также в ходе эксплуатации морского транспортного судна в условиях взволнованного моря на корпус действуют различного рода нагрузки, возникают механические напряжения в несущих судовых конструкциях. Постоянное превышение допустимых напряжений способно привести к возникновению остаточных деформаций, появлению трещин и в конце концов — к разрушению судового корпуса, т. е. потере общей прочности судна. Многочисленные рекомендации Международной морской организации [1], а также ведущих классификационных обществ Великобритании, Японии, США, России [2–5] относительно оснащения крупнотоннажных судов системами мониторинга корпусов не дали желаемого результата. Очень часто судовладельцы по тем или иным причинам уходят от установки таких систем, что приводит к гибели судов и их экипажей, потере перевозимых грузов, загрязнению морской окружающей среды нефтепродуктами. Одним из доказательств этого является гибель современного крупнотоннажного контейнеровоза «MOL COMFORT» (Япония) в июне 2013 года [6] в результате потери продольной прочности судового корпуса. Поэтому контроль механических напряжений в корпусе судна в реальном времени является обязательным условием обеспечения безопасности мореплавания.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Как правило, на современных морских судах контроль механических напряжений корпусов в процессе грузовых и балластных операций [2] основывается на информации о заполнении отдельных грузовых трюмов и балластных танков.

Широкое распространение на современных судах получили также программные комплексы [2, 7, 8] для

оценки общей прочности судов. Программное обеспечение предназначено для автоматизации расчетной оценки общей прочности судов и позволяет определять загрузку, посадку, остойчивость и прочность методом расчета по информации о перевозимом грузе.

Известные сейчас [9–12] системы контроля механических напряжений корпусов судов основаны на одинаковых принципах и отличаются лишь видом и числом применяемых датчиков. Судно обязательно оборудуется несколькими датчиками механических напряжений (деформаций). Датчики, используемые в таких системах контроля, построены на различных физических принципах. Это могут быть тензорезисторные преобразователи, основанные на явлении тензоэффекта, волоконно-оптические тензометры, магнитоупругие преобразователи, построенные на явлении магнитоупругого эффекта и другие [13–16].

Вместе с этим, современные средства контроля механических напряжений ферромагнитных стальных конструкций часто базируются на магнитных методах неразрушающего контроля [17–19]. Это связано с тем, что при воздействии на ферромагнетики больших растягивающих или сжимающих упругих напряжений могут существенно изменяться значения некоторых магнитных характеристик ферромагнитных материалов. Магнитные методы неразрушающего контроля основаны на анализе взаимодействия магнитного поля и объекта контроля и применимы лишь к конструкциям из металлов и сплавов, способных к намагничиванию.

Значительная часть используемых магнитных методов неразрушающего контроля требует проведения предварительного намагничивания или подмагничивания зоны контроля металла с использованием намагничивающих систем [20–22]. В этом случае трудность намагничивания повышается с увеличением габаритов конструкции, а также с увеличением количества труднодоступных и трудноконтролируемых узлов и других участков конструкции. На результаты измерений большое

влияние оказывает зазор между поверхностью контроля и преобразователем, что существенно снижает возможности магнитных методов неразрушающего контроля во время контроля механических напряжений ферромагнитных стальных конструкций.

В связи с этим весьма перспективными являются методы магнитного контроля, использующие остаточную намагниченность, к которым относится и феррозондовый метод [23–25], позволяющий проводить измерение напряженности магнитного поля рассеяния [26]. Таким образом, в основе современных средств контроля механических напряжений ферромагнитных стальных конструкций может лежать магнитометрический метод, позволяющий использовать в качестве намагничивающего поля только магнитное поле Земли, в котором находится ферромагнитный объект контроля.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объектом исследования в данной работе является магнитное поле рассеяния судового корпуса, представляемого как ферромагнитный объект контроля, с целью определения возможности применения магнитометрического метода для контроля механических напряжений корпуса судна в процессе его эксплуатации.

При этом задача исследования состоит в расчете магнитного поля рассеяния судового корпуса, необходимого для последующей разработки системы непрерывного контроля механических напряжений корпуса судна по величине остаточной намагниченности, измеряемой с помощью современных магнитомодуляционных преобразователей.

4. Материалы и методы исследования магнитного поля рассеяния корпуса судна

Судно, как объект контроля, обладает достаточно сложной формой (рис. 1). Так исследуемое судно типа «река-море» имеет следующие размеры: длина 128,43 м; ширина 15,63 м; высота борта 5,45 м. Несмотря на такие размеры по отношению к магнитному полю Земли, судно можно рассматривать как объект призматической формы («box-shape») с соответствующими размерами.

Для расчета магнитного поля рассеяния корпуса судна необходимо рассмотреть магнитное поле рассеяния ферромагнитного объекта контроля (ФОК), создаваемое однородным полем Земли, напряженностью H_0 .

Известно, что магнитное поле ФОК согласно [27] описывается следующими соотношениями:

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0; \operatorname{rot} \bar{H} = \bar{\delta}; \bar{B} = \mu \mu_0 \bar{H}; \mu_0 = \operatorname{const}, \quad (1)$$

где \bar{H} — вектор магнитной напряженности; \bar{B} — вектор магнитной индукции; $\bar{\delta}$ — плотность электрического тока.

Объем ФОК можно представить как совокупность объемных и поверхностных источников поля. Скалярный потенциал таких источников поля согласно [28] определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{1}{4\pi} \oint_S M_n \frac{dS}{|\bar{R}_Q - \bar{R}_P|} - \frac{1}{4\pi} \int_V \operatorname{div} \bar{M} \frac{dV}{|\bar{R}_Q - \bar{R}_P|}, \quad (2)$$

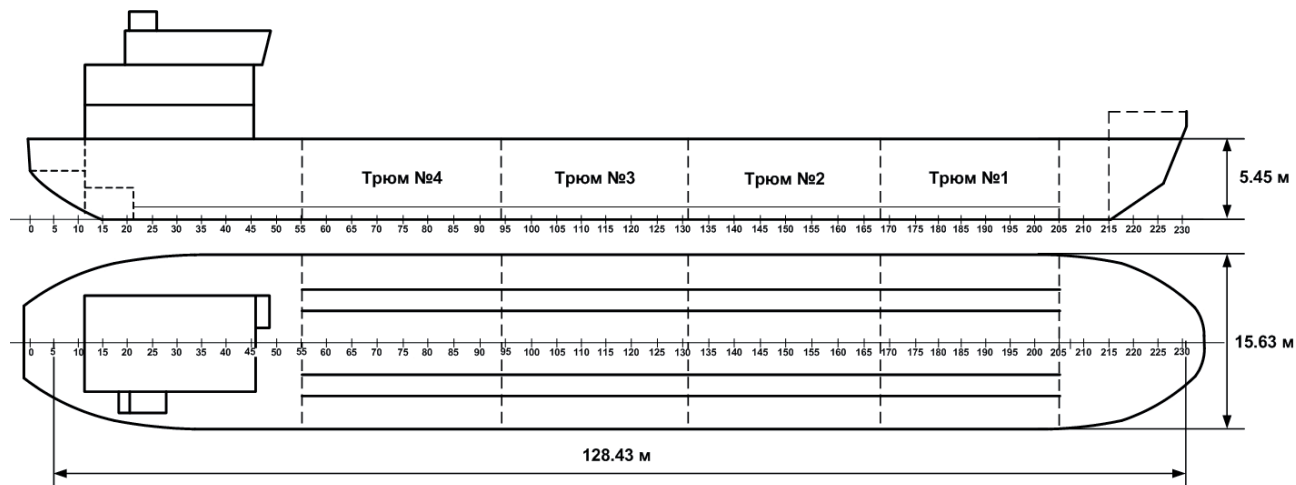


Рис. 1. Общий вид объекта контроля

где \bar{R}_Q, \bar{R}_P – векторы в точку источника и в точку наблюдения; S, V – площадь поверхности и объем ферромагнитного тела (ФТ); \bar{M} – вектор намагниченности; M_n – нормальная составляющая к поверхности ФТ вектора намагниченности.

Вместе с тем, в приложенном поле взаимосвязь намагниченности и напряженности поля ФОК определяется согласно выражению [27]:

$$M = \chi H_0, \quad (3)$$

где χ – магнитная восприимчивость ферромагнитного материала объекта контроля.

Известно, что остаточное поле рассчитывается при следующей зависимости между намагниченностью и напряженностью магнитного поля [29]:

$$M = M_0 + \chi_0 H, \quad (4)$$

где M_0 – остаточная намагниченность на заданной магнитной характеристике материала ФТ; χ_0 – обратная магнитная восприимчивость на заданной магнитной характеристике материала ФТ.

Допуская, что $\text{div} \bar{M} = 0$, можно полагать, что объемные заряды в объеме ФОК отсутствуют и тогда (2) будет иметь вид:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi} \oint_S M_n \frac{dS}{|\bar{R}_Q - \bar{R}_P|}. \quad (5)$$

Поэтому согласно (5), нормальная составляющая к поверхности ФТ вектора напряженности магнитного поля определяется следующим выражением [28]:

$$H_n = \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \frac{1}{4\pi} \oint_S M_n \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{|\bar{R}_Q - \bar{R}_P|} \right) dS - \frac{M_n}{2}. \quad (6)$$

В соответствии с [28, 30] формулу (6) можно преобразовать в интегральное уравнение Фредгольма 2-го рода:

$$\frac{M_n(Q)}{\chi} + \frac{1}{2\pi} \oint_S M_n \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{|\bar{R}_Q - \bar{R}_P|} \right) dS = 2H_{0n}(Q), \quad (7)$$

где H_{0n} – нормальная составляющая вектора напряженности магнитного поля внешнего источника.

Для остаточного поля с учетом формулы (4) можно записать следующее интегральное уравнение [28]:

$$M_n(Q) + \frac{\lambda}{2\pi} \oint_S M_n \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{|\bar{R}_Q - \bar{R}_P|} \right) dS = \frac{2\lambda M_{0n}}{\chi_0}, \quad (8)$$

где $\lambda = \frac{\chi_0}{2 + \chi_0}$.

С целью улучшения сходимости численного решения к интегральным уравнениям (7) и (8) следует добавить соотношение [28, 30], основанное на интегральном свойстве функции M_n :

$$\frac{1}{S} \oint_S M_n dS = 0. \quad (9)$$

В результате уравнения (7) и (8) примут вид:

$$\frac{M_n(Q)}{\chi} + \frac{1}{2\pi} \oint_S M_n(P) \left[\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{|\bar{R}_Q - \bar{R}_P|} \right) + \frac{2\pi}{S} \right] dS' = 2H_{0n}(Q). \quad (10)$$

$$M_n(Q) + \frac{\lambda}{2\pi} \oint_S M_n(P) \left[\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{|\bar{R}_Q - \bar{R}_P|} \right) + \frac{2\pi}{S} \right] dS' = \frac{2\lambda M_{0n}}{\chi_0}. \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) можно решить численным методом. Для этого поверхность ФОК необходимо аппроксимировать совокупностью площадок (рис. 2) [28]. При этом допускается, что в пределах прямоугольной площадки $M_n = \text{const}$. Таким образом, объем ФОК заменяется прямоугольной призмой.

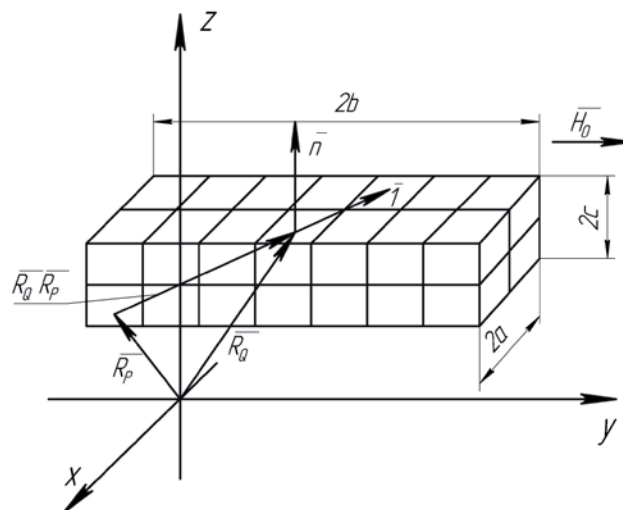


Рис. 2. Аппроксимация поверхности ФТ

Разбивка поверхности ФОК на элементарные площадки делает возможным редуцирование (10) и (11) к соответствующим системам линейных алгебраических уравнений согласно [28, 30]:

$$\left\{ [A] + \frac{1}{\chi[1]} \right\} [M_n] = 2[H_{0n}],$$

$$\left\{ [A] + \frac{1}{\chi[1]} \right\} [M_n] = \frac{2[M_{0n}]}{\chi_0}, \quad (12)$$

где $[1]$ – единичная матрица; $[A]$ – матрица коэффициентов, которые получены путем интегрирования ядра интегрального уравнения по элементарным площадкам; $[M_n]$ – вектор неизвестных значений намагниченности;

$[H_{0n}]$ – вектор нормальных составляющих вектора напряженности стороннего поля; $[M_{0n}]$ – вектор нормальных составляющих значений вектора начальной намагниченности.

Таким образом, определив величины M_n в каждой элементарной площадке, следует найти среднее значение нормальной составляющей намагниченности на каждой грани ФТ согласно выражению [28]:

$$\langle M_n \rangle = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K M_{nk}, \tag{13}$$

где M_{nk} – значение нормальной составляющей вектора намагниченности на одной грани.

После этого рассчитывается вектор намагниченности одной элементарной площадки, который соответствует магнитному состоянию ФОК и помещается в геометрический центр ФТ [28]:

$$\bar{M} = \bar{1}_x \langle M_{nx} \rangle + \bar{1}_y \langle M_{ny} \rangle + \bar{1}_z \langle M_{nz} \rangle, \tag{14}$$

где $\langle M_{nx} \rangle, \langle M_{ny} \rangle, \langle M_{nz} \rangle$ – среднее значение M_n на соответствующих гранях прямоугольной призмы.

Найденное значение \bar{M} дает возможность найти напряженность магнитного поля [31] в любой точке P вне корпуса судна (рис. 3):

$$H = H_x i_x + H_y i_y + H_z i_z. \tag{15}$$

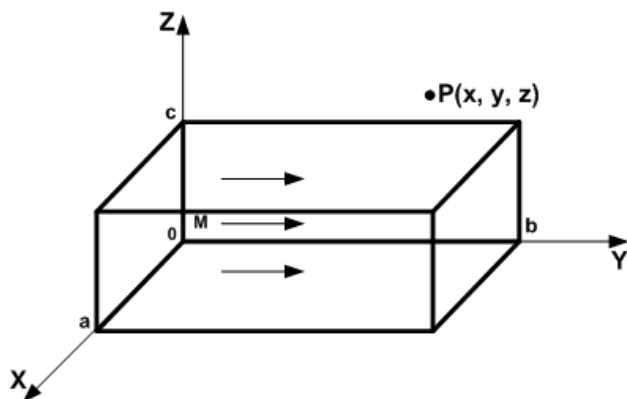


Рис. 3. Расчетная модель корпуса судна

Составляющие напряженности магнитного поля корпуса судна определяются согласно выражениям [29, 31]:

$$H_x = \frac{-M}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^{i+j+k} \ln \left[z_k + (x_i^2 + y_j^2 + z_k^2)^{1/2} \right];$$

$$H_y = \frac{-M}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^{i+j+k} \left\{ \begin{aligned} & \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{x_i y_j}{z_k (x_i^2 + y_j^2 + z_k^2)^{1/2}} \right] + \\ & + \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{y_j z_k}{x_i (x_i^2 + y_j^2 + z_k^2)^{1/2}} \right] \end{aligned} \right\};$$

$$H_z = \frac{-M}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^{i+j+k} \ln \left[x_i + (x_i^2 + y_j^2 + z_k^2)^{1/2} \right], \tag{16}$$

где $x_1 = x; y_1 = y; z_1 = z; x_2 = x - a; y_2 = y - b; z_2 = z - c$.

5. Результаты исследования магнитного поля рассеяния корпуса судна

Расчет поля рассеяния корпуса судна проводился на расстоянии 5–15 мм от поверхности комингса трюмов, в связи с этим можно полагать, что надстроечные части судна не влияют на величину магнитного поля рассеяния.

Таким образом, получены результаты расчетов напряженности магнитного поля рассеяния в некоторых точках вне корпуса исследуемого судна. Координаты точек соответствуют его каждому пятому шангоуту – поперечному элементу бортового набора судна. Распределение магнитного поля рассеяния корпуса по длине судна показано на рис. 4.

Также в расчет напряженности поля (табл. 1) были добавлены дополнительные точки, координаты которых определялись, исходя из рекомендаций ИМО.

Таблица 1

Расчет напряженности магнитного поля рассеяния судового корпуса в дополнительных точках

№	Название точки	Координаты точки	H_y , А/м	H_z , А/м	H , А/м
1.	Точка 1.1 (шангоут № 62)	(31,25; 0,005)	$3,678 \cdot 10^3$	-190,608	$3,678 \cdot 10^3$
2.	Точка 1.2 (шангоут № 62)	(31,25; 0,01)	$1,837 \cdot 10^3$	-190,955	$1,837 \cdot 10^3$
3.	Точка 1.3 (шангоут № 62)	(31,25; 0,015)	$1,223 \cdot 10^3$	-191,303	$1,223 \cdot 10^3$
4.	Точка 2.1 (шангоут № 119)	(62,50; 0,005)	$3,595 \cdot 10^3$	-5,461	$3,595 \cdot 10^3$

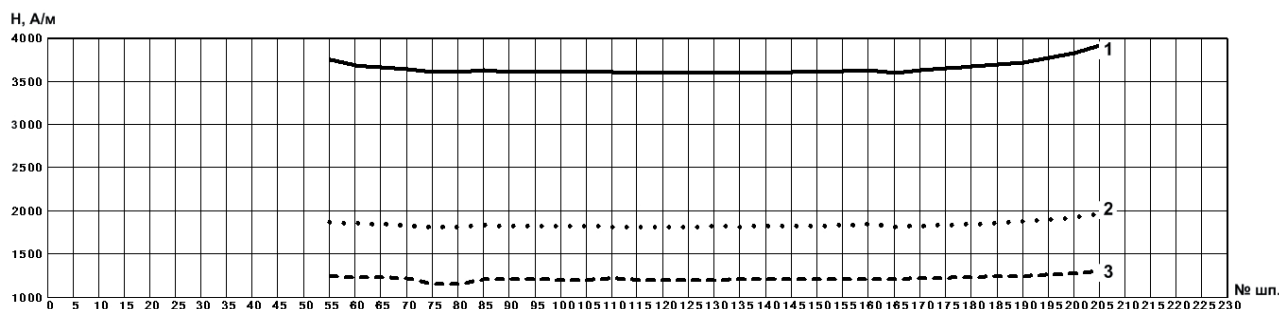


Рис. 4. Распределение магнитного поля рассеяния корпуса по длине судна: 1 – магнитное поле рассеяния корпуса судна на расстоянии 5 мм от поверхности комингса трюмов; 2 – на расстоянии 10 мм; 3 – на расстоянии 15 мм

Окончание табл. 1

№	Название точки	Координаты точки	H_y , А/м	H_z , А/м	H , А/м
5.	Точка 2.2 (шпангоут № 119)	(62,50; 0,01)	$1,804 \cdot 10^5$	-5,471	$1,804 \cdot 10^5$
6.	Точка 2.3 (шпангоут № 119)	(62,50; 0,015)	$1,197 \cdot 10^5$	-5,481	$1,197 \cdot 10^5$
7.	Точка 3.1 (шпангоут № 176)	(93,75; 0,005)	$3,653 \cdot 10^5$	149,525	$3,653 \cdot 10^5$
8.	Точка 3.2 (шпангоут № 176)	(93,75; 0,01)	$1,824 \cdot 10^5$	149,798	$1,824 \cdot 10^5$
9.	Точка 3.3 (шпангоут № 176)	(93,75; 0,015)	$1,222 \cdot 10^5$	150,071	$1,222 \cdot 10^5$

Согласно [1] зоны наибольших механических напряжений, как правило, наблюдаются в средней части судна (в районе мидель-шпангоута, шпангоут № 119 исследуемого судна) и в местах, которые находятся в 1/4 длины судна от носового и кормового перпендикуляров (шпангоуты № 176 и № 62 исследуемого судна соответственно) (рис. 5).

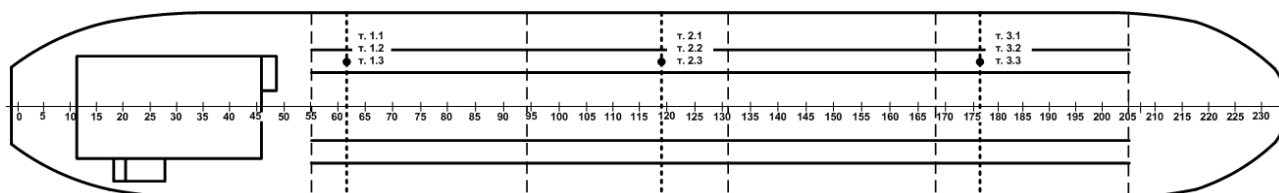


Рис. 5. Определение координат дополнительных точек расчета напряженности магнитного поля рассеяния судового корпуса

6. Обсуждение результатов исследования магнитного поля рассеяния корпуса судна

Таким образом, применение магнитометрического метода контроля механических напряжений возможно только в том случае, если величина магнитного поля, создаваемого объектом контроля, достаточная для его регистрации существующими магниточувствительными элементами [32]. При этом нужно отметить, что в рассматриваемом случае намагничивающим полем является только поле Земли величиной 40–80 А/м [33, 34]. Такая величина магнитного поля не может довести объект контроля до состояния, близкого к насыщению. Поэтому контролируемый объект имеет только остаточную намагниченность, благодаря которой на его поверхности и формируется магнитное поле рассеяния.

Для измерения величины остаточной намагниченности на поверхности судна наиболее перспективными являются магнитомодуляционные преобразователи — феррозонды. Теория феррозондов достаточно хорошо развита Р. И. Янусом, В. П. Табачником, Ю. В. Афанасьевым, В. В. Яковенко, среди зарубежных ученых известны: Ф. Ферстер, М. Акуна, П. Рипка, Гао Зун-Ченг и многие другие. Феррозонды широко используются в магнитной дефектоскопии для регистрации полей рассеяния дефекта. Из-за особенных условий эксплуатации на морских судах их размеры должны быть соизмеримы с размерами выявляемых дефектов, в то время как контроль остаточной намагниченности для достижения наибольшей чувствительности следует проводить феррозондами длиной 50–100 мм.

7. Выводы

Результаты исследования магнитного поля рассеяния корпуса судна показали, что диапазон измерения напряженности находится в пределах 50...5700 А/м и достаточный для ее измерения современными магнитомодуляционными преобразователями.

Рассматриваемый метод является эффективным методом контроля механических напряжений корпуса судна, который предотвращает превышение допускаемых напряжений в несущих судовых конструкциях, что может привести к разрушению корпуса.

Таким образом, решение теоретических и практических задач по развитию магнитометрического метода контроля механических напряжений корпуса судна является актуальной научно-технической задачей, позволяющей продлевать срок эксплуатации судна и оперативно выявлять потенциально опасные места до момента возникновения аварийных ситуаций путем оборудования крупнотоннажных судов современными системами непрерывного контроля механических напряжений корпусов.

Литература

1. MSC/Circ.646. Recommendations for the fitting of Hull Stress Monitoring Systems [Electronic resource] / The official website of the International marine organization. — 06.06.1994. — Available at: \www/URL: <http://www.imo.org/>. — 22.08.2015.
2. НДН 2-020101-044. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов [Текст]. Том 4. Часть XVIII. Общие правила по конструкции и прочности навалочных судов. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006. — 475 с.
3. Common Structural Rules for Bulk Carriers [Electronic resource] / The official website of the Nippon Kaiji Kyokai (Class NK). — Available at: \www/URL: <http://www.classnk.or.jp>. — 22.08.2015.
4. Guide for hull condition monitoring systems [Electronic resource] / The official website of the American bureau of shipping. — Available at: \www/URL: <http://www.eagle.org/>. — 22.08.2015.
5. Provisional Rules for the Classification of Hull Surveillance Systems SEA and SEA(R) notations [Electronic resource] / The official website of the Lloyd's Register of Shipping. — Available at: \www/URL: <http://www.lr.org/>. — 22.08.2015.
6. Investigation Report on Structural Safety of Large Container Ships [Electronic resource] / The official website of the Nippon Kaiji Kyokai (Class NK). — Available at: \www/URL: <http://www.classnk.or.jp/>. — 22.08.2015.
7. Вагущенко, Л. Л. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности [Текст] / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко, С. И. Заичко. — Одесса: ФЕНИКС, 2005. — 274 с.
8. Программный комплекс «StabEdit» [Электронный ресурс] / Официальный сайт Центрального научно-исследовательского института морского флота. — Режим доступа: \www/URL: <http://www.cniimf.ru/>. — 22.08.2015.

9. Hull Stress Monitoring System «HULLMOS» [Electronic resource] / The official website of company ROUVARI OY (Finland). — Available at: \www/URL: http://www.rouvari.fi/. — 22.08.2015.
10. The fiber optic hull stress monitoring system «SENSFIB» [Electronic resource] / The official website of company Light Structures AS (Norwegian). — Available at: \www/URL: http://www.lightstructures.no/. — 22.08.2015.
11. Hull Condition Monitoring System «HMON» [Electronic resource] / The official website of the WEIR-JONES GROUP (Canada). — Available at: \www/URL: http://www.weir-jones.com/. — 22.08.2015.
12. Integrated Marine Monitoring System [Electronic resource] / The official website of the BMT Scientific Marine Services (USA). — Available at: \www/URL: http://www.scimar.com/. — 22.08.2015.
13. Мирошников, В. В. Контроль прочности корпуса судна [Текст] / В. В. Мирошников, О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко. — Херсон: Гринь Д. С., 2015. — 108 с.
14. Magalhães, R. R. The use of conventional strain gauges evaluation for measurements of residual stresses in welded joints [Text] / R. R. Magalhães, A. B. Vieira Junior, S. R. Barra // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. — 2013. — Vol. 36, № 1. — P. 173–180. doi:10.1007/s40430-013-0082-2
15. Sirkis, J. S. Interferometric-fiber-optic strain sensor [Text] / J. S. Sirkis, C. E. Taylor // Experimental Mechanics. — 1988. — Vol. 28, № 2. — P. 170–176. doi:10.1007/bf02317568
16. Trémolet de Lacheisserie, du É. Magnetoelastic Effects Magnetoelastic Effects [Text] / É. du Trémolet de Lacheisserie, D. Gignoux, M. Schlenker // Magnetism. — New York: Springer, 2002. — P. 351–398. doi:10.1007/978-0-387-23062-7_12
17. Ключев, В. В. Неразрушающий контроль и диагностика [Текст]: справочник / под ред. В. В. Ключева. — М.: Машиностроение, 2005. — 656 с.
18. Blitz, J. Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing [Text] / J. Blitz. — Springer Netherlands, 1997. — 261 p. doi:10.1007/978-94-011-5818-3
19. Xin, Q. Magnetic Barkhausen Noise, Metal Magnetic Memory Testing and Estimation of the Ship Plate Welded Structure Stress [Text] / Q. Xin, D. Shu, L. Hui, W. Wei, J. Chen // Journal of Nondestructive Evaluation. — 2012. — Vol. 31, № 1. — P. 80–89. doi:10.1007/s10921-011-0123-7
20. Завальнюк, О. П. Применение коэрцитиметрии для анализа технического состояния корпусов судов различных сроков эксплуатации [Текст] / О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко // Контроль. Диагностика. — Москва, 2013. — № 4. — С. 22–27.
21. Матюк, В. Ф. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии [Текст] / В. Ф. Матюк, В. Н. Кулагин // Неразрушающий контроль и диагностика. — Минск, 2010. — № 3. — С. 4–13.
22. Безлюдько, Г. Я. Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом [Текст] / Г. Я. Безлюдько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — Киев, 2003. — № 2. — С. 20–26.
23. Forslund, A. Designing a Miniaturized Fluxgate Magnetometer [Text] / A. Forslund. — Stockholm: Royal Institute of Technology, 2006. — 81 p.
24. Kabata, W. Technical procedures to select basic parameters of a fluxgate magnetometer [Text] / W. Kabata, I. Vitorello // Revista brasileira de geofisica. — 2011. — Vol. 29, № 3. — P. 455–462.
25. Мирошников, В. В. Резонансный режим работы феррозонда [Текст] / В. В. Мирошников, С. В. Костин, Н. И. Карманов, Н. В. Мартыненко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. — 2012. — № 40. — С. 35–46.
26. Augustyniak, M. Discussion of Derivability of Local Residual Stress Level from Magnetic Stray Field Measurement [Text] / M. Augustyniak, Z. Usarek // Journal of Nondestructive Evaluation. — 2015. — Vol. 34, № 3. — P. 1–9. doi:10.1007/s10921-015-0292-x
27. Тозони, О. В. Расчет трехмерных электромагнитных полей [Текст] / О. В. Тозони, И. Д. Майергойз. — К.: Техника, 1974. — 352 с.
28. Курбатов, П. А. Численный расчет электромагнитных полей [Текст] / П. А. Курбатов, С. А. Аринчин. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 164 с.
29. Розенблат, М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники [Текст] / М. А. Розенблат. — М.: Наука, 1966. — 720 с.
30. Крупин, В. Г. Высшая математика. Уравнения математической физики. Сборник заданий [Текст]: учебное пособие / В. Г. Крупин, А. Л. Павлов, Л. Г. Попов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010. — 353 с.
31. Том, Р. Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок: основы расчета магнитных полей и сил [Текст] / Р. Том, Дж. Тарр; пер. с англ. Ю. А. Горшков. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 268 с.
32. Завальнюк, О. П. Магнитный контроль корпусов морских судов в процессе грузовых и балластных операций [Текст] / О. П. Завальнюк, В. В. Мирошников // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. — 2012. — № 18(189). — С. 76–82.
33. Прохоров, А. М. Физическая энциклопедия [Текст]. Т. 2. Добротность — Магнитооптика / А. М. Прохоров, Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. — М.: Сов. энциклопедия, 1990. — 704 с.
34. Никитский, В. Е. Магниторазведка [Текст]: справочник геофизика / под ред. В. Е. Никитского, Ю. С. Глебовского. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1990. — 470 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІТОМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ КОРПУСУ СУДНА

У статті досліджена можливість застосування магнітометричного методу для контролю механічних напружень корпусу судна, для чого виконаний розрахунок магнітного поля розсіювання корпусу як феромагнітного об'єкта контролю, створюваного однорідним полем Землі. При цьому судновий корпус представляється сукупністю поверхневих джерел поля. Показано, що визначена величина магнітного поля достатня для його реєстрації магніточутливими елементами.

Ключові слова: корпус судна, феромагнітний об'єкт контролю, механічні напруження, магнітне поле розсіювання.

Завальнюк Ольга Петровна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра експлуатації судового електрооборудовання і средств автоматики, Херсонська державна морська академія, Україна, e-mail: olga-zavalnjuk@mail.ru.

Завальнюк Ольга Петрівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, Херсонська державна морська академія, Україна.

Zavalnjuk Olga, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: olga-zavalnjuk@mail.ru