

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ КОЕРЦИТИМЕТРІЇ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ СТАНІВ КОРПУСУ СУДНА

© Завальнюк О.П., 2015

У статті розглядається можливість застосування методу коерцитиметрії для ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна, який би урахував невизначеність відносно миттєвого стану корпусу, вплив випадкових факторів, утому і старіння матеріалу суднових конструкцій. Проведено аналіз залежності коерцитивної сили і діючих напружень при статичному розтяганні плоских зразків конструкційних сталей, які найбільш поширені при будівництві корпусів суден. Наведені результати вимірювання коерцитивної сили матеріалу суднових конструкцій під час експлуатації судна.

**Ключові слова:** міцність судна, напружено-деформований стан, неруйнівний контроль, метод коерцитиметрії.

**In the article possibility of application of coercimetric method is considered for identification of the stress-strained states of hull, which would take into account a uncertainty in relation to the instantaneous state of hull, influence of casual factors, fatigue and senescence of material of ship constructions. The analysis of dependence of coercive force and operating stresses is carried out at static tension of flat standards of construction steels, which are most widespread at the construction of ship's hull. The results of measuring of coercive force of material of ship constructions during maintenance of ship are presented.**

**Keywords:** hull strength, stress-strained state, non-destructive control, coercimetric method.

**Вступ.** Судно – це складна інженерна споруда, яка для виконання свого призначення повинна володіти рядом якостей, у тому числі, і міцністю. Корпус судна працює на межі двох стихій (води і повітря) і схильний до впливу навантажень, значення і напрям дії яких безперервно та випадково змінюються. Зв'язки корпусу, який представляє собою складну порожнисту балку, беруть участь одночасно у декількох видах деформацій. З часом міцність зв'язків корпусу змінюється через неминучий знос, корозію, залишкові деформації. Причому ці зміни залежать не тільки від тривалості експлуатації судна, але і від особливостей конструкції корпусу та, щонайбільше, від умов експлуатації судна. Все це нерідко веде до зростання кількості аварій на торговельних суднах, причиною яких у значній кількості випадків є порушення загальної міцності корпусу судна.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Наразі почастишали випадки загибелі суден класу «ріка-море», які супроводжуються людськими жертвами та значними матеріальними збитками, а також завдають шкоди навколишньому середовищу. Підтвердженням цьому служать численні випадки катастроф навалювальних суден (балкерів), що призначені для перевезення грудкових, зернистих і порошковатих вантажів без тари – навалом чи насипом [1].

Дослідження причин аварій навалювальних суден показують [2], що у 70 % випадків їх загибелі загальними були три чинники: судна мали вік не менше 18 років, перевозили важкі мінеральні вантажі, відбувалося потрапляння води у вантажні приміщення під час поганої погоди. Основними причинами, що привели до загибелі суден, були значна корозія і тріщини в конструкції

вантажних приміщень. Причини, що сприяли пошкодженню корпусу, – перенапруження через некоректне завантаження і фізичні пошкодження бічних конструкцій під час розвантаження.

Ще у 1994 році з метою зменшення рівня конструктивних пошкоджень балкерів Комітетом з безпеки на морі ІМО (International Maritime Organization) рекомендовано [3] обладнати судна з повною вантажопідйомністю від 20 тисяч тонн системами моніторингу корпусу. Причому давачі механічних напружень корпусу судна повинні бути встановленими у його середній частині (на мідельшпангоуті) та у місцях, що знаходяться в  $\frac{1}{4}$  довжини судна від носового та кормового перпендикулярів. Однак на сучасному етапі тільки деякі судна мають подібні системи моніторингу технічного стану корпусів.

Методи неруйнівного контролю, засновані на вимірюванні коерцитивної сили, знайшли широке розповсюдження у багатьох галузях промисловості [4, 5, 6], бо коерцитивна сила являється однією з найбільш структурно чутливих характеристик феромагнетних матеріалів. Їх відрізняє висока точність і достатня простота, можливість проведення вимірів на локальних ділянках контрольованих об'єктів, висока чутливість до фазових перетворень, слабка залежність від геометричних розмірів об'єкта контролю тощо.

Для контролю та ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна під час його експлуатації можливо використовувати метод неруйнівного контролю шляхом вимірювання коерцитивної сили матеріалу несних суднових конструкцій, якими є горизонтальний киль, ширстречний стрингер, горизонтальна частина комінгсу люків.

**Метою дослідження** являється проведення аналізу можливості застосування методу коерцитиметрії для ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна, який би урахував невизначеність відносно миттєвого стану корпусу, вплив випадкових факторів, утому і старіння матеріалу суднових конструкцій.

**Результати досліджень.** У суднобудуванні та судноремонті неруйнівний контроль застосовується досить тривалий час і служить для виявлення мікроскопічних поверхневих, підповерхневих і внутрішніх дефектів без руйнування конструкцій чи деталей та за цією ознакою відноситься до методів дефектоскопії. Серед великого розмаїття методів неруйнівного контролю використовують капілярні, магнетні, вихорострумові, ультразвукові, рентгенівські та гама-ізотопні. Однак застосування методів неруйнівного контролю для ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна під час його експлуатації у реальному часі поки що не набуло широкого розповсюдження.

Одним з методів неруйнівного контролю, що дозволяє визначати напружені ділянки, є метод коерцитиметрії, заснований на кореляції між магнетними характеристиками і структурно-фазовим станом та характеристиками міцності сталей. У якості параметру неруйнівного контролю механічних властивостей сталі, зокрема, використовується коерцитивна сила [4].

Коерцитивною силою називається напруженість зовнішнього магнетного поля, при якій намагнетченість у матеріалі, попередньо намагнетченому до насичення, стає рівною нулю. Вона визначається середньою величиною сил, що затримують необоротне зміщення границь між доменами (окремими мікрообластями феромагнетного матеріалу) при перемагнетчуванні.

У загальному випадку можна сказати, що коерцитивна сила феромагнетиків (сталі) визначається усією сукупністю різних факторів [7]: величиною магнетної анізотропії ( $K_1$ ), магнетострикцією ( $\lambda_s$ ), внутрішніми і зовнішніми механічними напруженнями ( $\sigma$ ), мірою насичення ( $J_s$ ), факторами розмагнетчування та граничними шарами між доменами ( $a, b, c$ ):

$$H_c \approx f \left( a \frac{K_1}{J_s} + b \frac{\lambda_s \sigma}{J_s} + c J_s \right). \quad (1)$$

В основі контролю механічних напружень, діючих у сталевих конструкціях, за значеннями коерцитивної сили лежить магнетострикційний зв'язок між прикладеними напруженнями та зміщенням доменних границь [4].

Єдність природи намагнечування металу, пружнопластичної деформації, накопичення пошкоджень і росту коерцитивної сили яскраво відображує моделювання процесу навантаження на зразках металу під час експлуатації в умовах складнонапруженого стану [6]. На рис. 1 представлені залежності коерцитивної сили  $H_c$  і діючих напружень  $\sigma$  при статичному розтяганні плоских зразків конструкційних сталей Ст3, Ст20, 09Г2С, які найбільш поширені при будівництві корпусів суден. Під час безперервного розтягання стандартних зразків товщиною 5-10 мм у пружній області кривої навантаження коерцитивна сила збільшується пропорційно прикладеному напруженню до величини  $H_{c.m}$ , що відповідає межі течкості  $\sigma_m$ . В області течкості і знеміцнювання металу починається необоротна перебудова доменної структури за рахунок 90- і 180-градусних доменних границь.

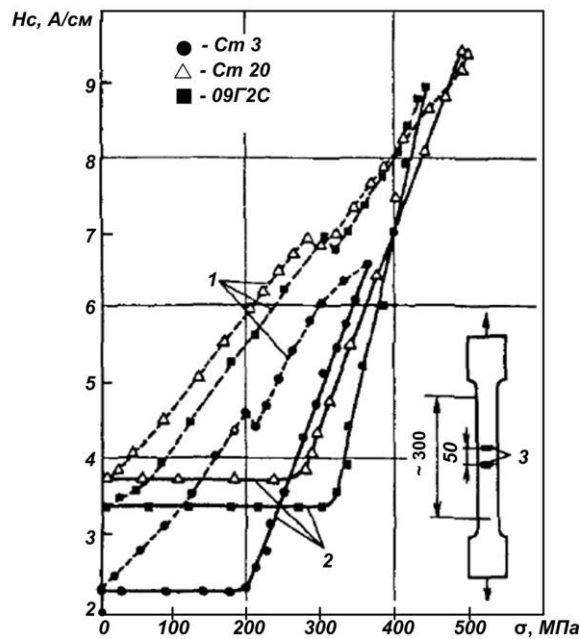


Рис. 1. Залежність коерцитивної сили і діючих напружень при випробовуванні зразків на розтягання:  
1 – під навантаженням; 2 – після розвантаження; 3 – полюсні наконечники коерцитиметру

При підвищенні навантаження в області необоротних деформацій зростання коерцитивної сили триває одночасно з формуванням нової доменної структури та активним накопиченням пошкоджень у металі. Зміцнення металу на стадії передруйнування викликає остаточну перебудову доменної структури, зростання коерцитивної сили до максимальних значень (в залежності від марки сталі) та супроводжується появою крихких мікротріщин на стиках і границях зерен. Після утворення і розкриття магістральної тріщини відбувається часткове зняття напружень у зоні розвитку тріщини і зниження коерцитивної сили. Максимальне значення  $H_{c.6}$  відповідає межі міцності металу  $\sigma_6$ . При ступінчастому навантаженні та вимірюванні коерцитивної сили після розвантаження зразка, коли магнітний параметр реагує тільки на залишкові (внутрішні) напруження і деформації, у пружній області коерцитивна сила залишається постійною, рівною вихідній, а після досягнення межі течкості вона зростає за лінійним законом. При цьому енергія, що затрачується на роботу руйнування металу, і максимальні значення коерцитивної сили в обох випадках практично однакові.

Таким чином, енергетична теорія руйнування дозволяє визначити базові параметри для контролю за станом металу магнетним методом за величиною коерцитивної сили (к.с.), а саме:  $H_{c0}$  – вихідне значення коерцитивної сили (у первинному ненапруженому стані значення коерцитивної сили є найменшим для кожної марки сталі);  $H_{c.m}$  – відповідає рівню внутрішніх

напружень, рівних межі течкості сталі  $\sigma_m$ ;  $H_{c.в}$  – відповідає досягненню межі міцності сталі  $\sigma_{\sigma}$ . У таблиці 1 наведено механічні характеристики і відповідні їм значення коерцитивної сили для декількох конструкційних сталей (Ст 3, Ст 20, 09Г2С).

Таблиця 1.

**Механічні характеристики і коерцитивна сила конструкційних сталей**

Марка сталі	Механічні властивості			Коерцитивна сила			
	Межа міцності $\sigma_{\sigma}$ , МПа	Умовна межа течкості $\sigma_{0,2}$ , МПа	Відносне подовження $\delta$ , %	Вихідне значення $H_{c0}$	Межі течкості $H_{c.m}$	Межі міцності $H_{c.в}$	Втомного стану $H_{c.ум}$
Ст 3	350	210	22	2.5	5.0	6.0	5.8
Ст 20	420	260	24	4.5	10.5	13.5	13.0
09Г2С	450	310	20	4.0	7.8	9.5	9.5

Слід також враховувати [8], що межі течкості і міцності та відповідні їм значення коерцитивної сили для матеріалу зварених конструкцій під дією навантажень дещо вищі, ніж для матеріалу плоских зразків.

Важливо, що, користуючись методом коерцитиметрії, для кожної марки сталі існують свої величини коерцитивної сили у первинному ненапруженому стані  $H_{c0}$ , і в стані, еквівалентному напруженням на межі міцності  $H_{c.в}$ . Різниця  $\Delta H_c = H_{c.в} - H_{c0}$  характеризує собою потенційний експлуатаційний ресурс металу. В залежності від поєднання експлуатаційних факторів та інтенсивності навантажень судна його ресурс може витрачатися з різною швидкістю. Тому цей процес можливо контролювати шляхом вимірювання величини коерцитивної сили металу, особливо у характерних зонах концентрації механічних напружень суднових корпусних конструкцій.

З метою перевірки застосування методу коерцитиметрії для ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна були здійснені експериментальні вимірювання коерцитивної сили матеріалу несних суднових конструкцій (конструкційна сталь Ст 3) з використанням коерцитиметра КРМ-Ц-К2М (структуроскопа) на теплоході «Сибирский-2101».

Принцип роботи структуроскопа [6] заснований на обчисленні коерцитивної сили за вимірюваним струмом компенсації залишкової магнетної індукції у замкнутому магнетному колі магнетопроводу і контрольованої конструкції чи стандартного зразка (під час калібрування).

Цикл вимірювання включає наступні етапи:

- магнетну підготовку тривалістю до 3 с;
- компенсацію залишкової намагненості тривалістю до 3 с;
- обчислення коерцитивної сили тривалістю до 2 с;
- індикацію та сигналізацію результатів вимірювання.

У процесі магнетної підготовки область досліджуваної конструкції між полюсними наконечниками магнетної системи перетворювача (рис. 2) періодично намагнетчується до насичення імпульсами струму з амплітудою не менше 3 А.

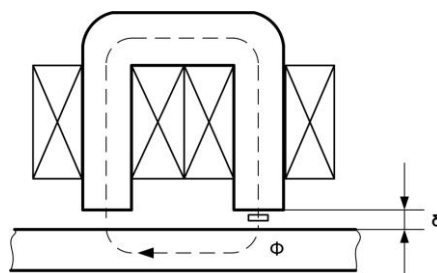


Рис. 2. Перетворювач коерцитиметра ( $\Phi$  – магнетний потік;  $\delta=1,5$  мм – проміжок)

Далі здійснюється автоматична компенсація поля залишкової намагненості таким чином, щоб звести її до 0. Контроль залишкової намагненості здійснюється вбудованим у магнетопровід перетворювачем Холла. За величиною струму компенсації обчислюється коерцитивна сила.

Блок-схему приладу КРМ-Ц-К2М наведено на рис. 3. Перетворювач структуроскопу являє собою магнетну систему, яка замикається контрольованою феромагнетною конструкцією. П-видний магнетопровід виконано з магнетном'якого пластинчастого матеріалу. На магнетопроводі розташовані котушки для намагнечування контрольованої конструкції і компенсації поля залишкової індукції. У якості нуля-індикатора індукції магнетного поля обрано перетворювач Холла, який розміщено у проміжку магнетопроводу.

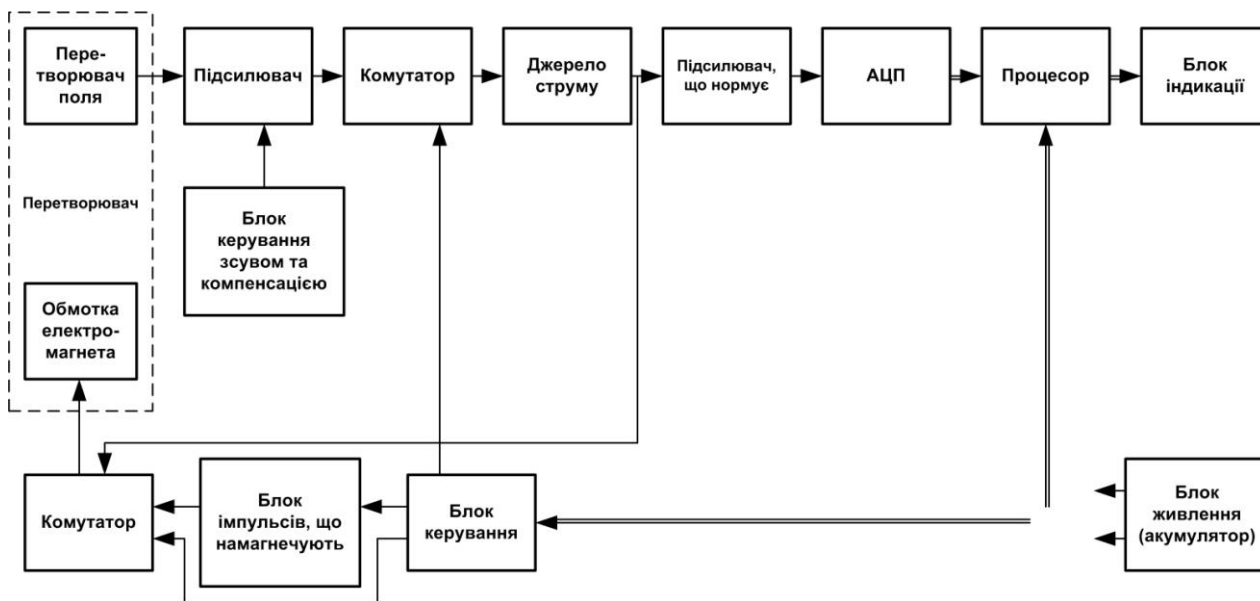


Рис. 3. Блок-схема приладу КРМ-Ц-К2М

Експериментальні дослідження на теплоході «Сибирский-2101» були виконані під час ремонту судна та після ремонту при проведенні вантажних операцій. Під час експерименту відбувалося вимірювання коерцитивної сили матеріалу комінгсу люка – верхньої площини балки.

Аналізуючи отримані результати вимірів під час ремонту судна, встановлене наступне:

1. Утомні явища коерцитиметром простежуються за всією довжиною судна на обох бортах.
2. Області максимальних значень коерцитивної сили дещо зміщені в ніс від міделя (135 шпангоут), а також співпадають з районами  $\frac{1}{4}$  довжини судна від носового і кормового перпендикулярів.

3. Криві результатів вимірювань стану подовжніх елементів набору корпусу (комінгсів) теплоходу «Сибирский-2101» показують, що місця підвищеного зносу корпусу майже співпадають з місцями, рекомендованими ІМО для установки давачів механічних напружень.

Вимірювання під час вантажних операцій виконувалися на кожному етапі завантаження судна:

- 1 етап – прихід судна в баласті на термінал завантаження зернових (рис. 4, а);
- 2 етап – завантаження трюму №4 (437 т) і частково трюму №3 (150 т) (рис. 4, б);
- 3 етап – завантаження трюмів №4 (437 т) і №3 (460 т) (рис. 4, в);
- 4 етап – повне завантаження всіх чотирьох трюмів: №1 (455 т), №2 (457 т), №3 (460 т), №4 (437 т) (рис. 4, г).

Результати вимірювань коерцитивної сили (поперечні складові) комінгсів лівого борту на теплоході «Сибирский-2101» під час завантаження представлено на рис. 5.

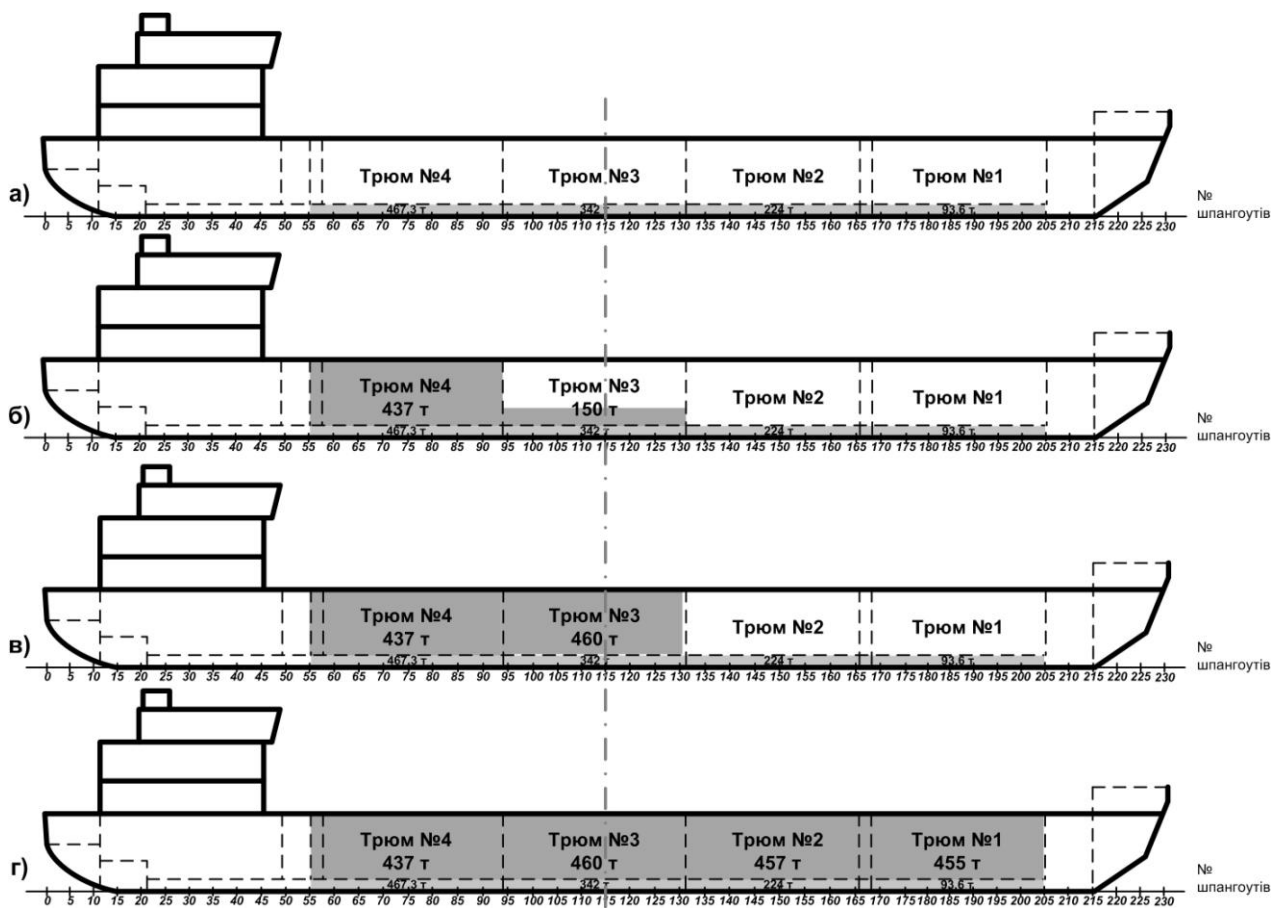


Рис. 4. Схеми завантаження теплоходу «Сибирский-2101» при вимірюваннях:  
а) – 1 етап; б) – 2 етап; в) – 3 етап; г) – 4 етап

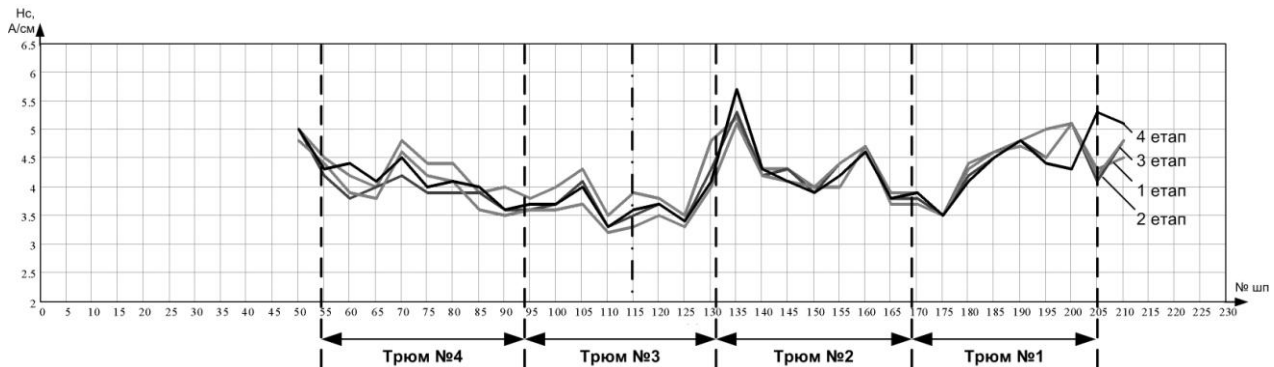


Рис. 5. Результати вимірювань коерцитивної сили (поперечні складові) комінгсів лівого борту на теплоході «Сибирский-2101» під час завантаження

Візуальний огляд, проведений на теплоході «Сибирский-2101», підтвердив наявність дефектів у суднових конструкціях, виявивши, зокрема, деформацію стояків фальшборту в області з'єднання їх з головною палубою в районі 135 шпангоута правого і лівого бортів; розрив вертикальної стінки комінгса люка в районі 100-110 шпангоутів правого борту; розриви настилу головної палуби в районі 110 шпангоута правого борту, що обумовлює напруженість цих ділянок.

Результати вимірювань коерцитивної сили на досліджуваному судні під час ремонту та експлуатації, а також їх порівняння з підсумками візуального огляду свідчать про можливість застосування методу коерцитиметрії для ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу

судна, який ураховує невизначеність відносно миттєвого стану корпусу, вплив випадкових факторів, утому і старіння матеріалу суднових конструкцій.

**Висновки.** Для ідентифікації напружено-деформованих станів корпусу судна можливо застосовувати метод неруйнівного контролю шляхом вимірювання коерцитивної сили, який дозволяє отримати кількісну оцінку щодо напружено-деформованих станів та утоми металу корпусу за всією довжиною судна.

Існує необхідність продовжити експериментальні дослідження щодо вимірювання коерцитивної сили матеріалу корпусних конструкцій на судах різних типів та віку на тихій воді, в умовах хвилювання, при проведенні вантажних і баластних операцій, у стані ремонту тощо з метою порівняння отриманих результатів експерименту з побудованою у подальшому математичною моделлю процесу завантаження-розвантаження (баластування-дебаластування) судна.

Грунтуючись на отриманих результатах вимірювань, а також на адекватній математичній моделі, доцільно створити систему моніторингу загальної міцності судна під час його експлуатації. Здобуті експериментальні данні дозволять визначити оптимальну схему розташування давачів по корпусу судна та періодичність їх опитування у розробленій системі моніторингу, яка допоможе запобігти аварії, пов'язані із втратою міцності корпусу через перевищення допустимих навантажень.

1. Офіційний сайт Російського морського реєстра судноплавства. XII семінар Російського морського реєстра судноходства «Качественное судноходство: стандарт XXI века. Безопасность и защита морской среды: грядущие перемены» (Санкт-Петербург, октябрь-2009) – Режим доступу до сайту: <http://www.rs-head.spb.ru/>. 2. Офіційний сайт Міжнародної Асоціації Власників Суховантажних Суден (INTERCARGO). Casualty Report 2009 – Режим доступу до сайту: <http://www.intercargoo.org/>. 3. Офіційний сайт Міжнародної морської організації. MSC/Circ.646. Recommendations for the fitting of Hull Stress Monitoring Systems, 06.06.1994 – Режим доступу до сайту: <http://www.imo.org/>. 4. Матюк В.Ф. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии / В.Ф.Матюк, В.Н. Кулагин // Неразрушающий контроль и диагностика. – Минск, 2010. – №3. – С. 4-13. 5. Безлюдько Г.Я. Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом / Г.Я. Безлюдько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев, 2003. – №2. – С. 20-26. 6. Попов Б.Е. Магнитная диагностика и остаточный ресурс подъемных сооружений / Б.Е. Попов, В.С. Котельников, А.В. Зарудный, Е.А. Левин, Г.Я. Безлюдько // Безопасность труда в промышленности. – Москва, 2001. – №2. – С. 44-49. 7. Гаврилов А.Н., Чижиков В.Ю. Технология магнитных элементов для приборов, средств автоматики и вычислительной техники. – М: Энергия, 1974. – 232 с. 8. Головешкин Ю.В. Третья проблема строительной механики корабля (нормирование прочности) / Ю.В. Головешкин, Н.И. Тузлукова. – СПб.: Судостроение, 1999. – 154 с.