

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКОВАНИХ МАГНІТОСТАТИЧНИХ ПОЛІВ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ У ТРИВИМІРНОМУ ПРОСТОРИ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В.М. Рябенський*, докт.техн.наук, **І.І. Чудайкін****, канд.техн.наук, **Ю.Д. Таргунакова*****
Національний Університет Кораблебудування ім. адмірала Макарова,
пр. Центральний, 3, Миколаїв, 54021, Україна, e-mail: golubkajulya@gmail.com

Запропоновано методологію реалізації модифікованого методу граничних елементів (ММГЕ) та створення програмного комплексу МВЕМ на базі цього методу для розрахунку та моделювання індукованого магнітного поля тонкостінних конструкцій у тривимірному просторі. В статті наводяться значення вектора результуючої магнітної напруженості тонкостінного циліндра, які розраховані на основі ММГЕ в програмному комплексі МВЕМ та підтверджені результатами, отриманими завдяки методу скінченних елементів у програмному комплексі ANSYS. Значення магнітного потенціалу, отримані з застосуванням розробленого методу, були підтверджені аналітичними розрахунками. Бібл. 19, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: розрахунок та комп'ютерне моделювання скалярного магнітного потенціалу та вектора напруженості індукованого магнітного поля тонкостінних конструкцій; модифікований метод граничних елементів (ММГЕ); методологія реалізації ММГЕ та програмного комплексу МВЕМ.

Дослідження магнітного поля дає цінну інформацію як для вирішення загальних питань будови і еволюції Землі, так і для пошуку родовищ корисних копалин, трасування трубопроводів, пошуку затонулих суден, авіабомб і підземних снарядів, які не розірвалися, виявлення і вивчення затонувлих об'єктів культурної спадщини [14, 4, 18]. Ідентифікація затонувлих об'єктів називається оберненою задачею морської магнітометрії (ОЗММ). Розв'язання цієї задачі виконується у декілька етапів. Першим етапом ОЗММ є розв'язання прямої задачі морської магнітометрії (ПЗММ) [8]. В інтерпретації магнітних даних виняткове значення має пряма задача [3]. Суть ПЗММ становить розрахунок та моделювання аномального магнітного поля за відомими геометричними характеристиками і фізичними властивостями об'єктів [2].

Сучасний стан наукових досліджень в області аналізу магнітостатичних полів характеризується широким використанням чисельних методів, оскільки існуючі аналітичні методи не завжди забезпечують розв'язання поставлених завдань [10]. У випадку феромагнітних тіл складної просторової конфігурації аналітичні розрахунки магнітного поля, особливо на значній відстані від об'єкта, можуть мати істотну похибку [12]. На сьогодні існує ряд чисельних методів, що дають змогу моделювати магнітне поле електромагнітних систем. Серед них можна виділити такі групи класичних методів: метод скінченних різниць (МСР), метод скінченних елементів (МСЕ), метод граничних елементів (МГЕ) і методи інтегральних рівнянь (метод вторинних джерел (МВД)) [11]. Аналіз існуючих систем автоматизованого проектування (САП) для розрахунку і моделювання магнітних полів показав, що понад 90% сучасних інженерних програм розрахунку ґрунтуються на МСЕ. Такі САП мають усі недоліки, що і МСЕ, та високу вартість ліцензій. На цей час не існує універсальних САП на базі МВД та МГЕ, які за своїми можливостями були б аналогічні програмам на основі МСЕ (наприклад, до програмного комплексу ANSYS) [19, 9].

Багато методів розв'язання ОЗММ базуються в тому чи іншому вигляді на методах підбору, що вимагає багаторазового застосування алгоритму розв'язання ПЗММ. Це диктує необхідність того, щоб самі ці алгоритми були стійкі до обчислювальних похибок і на порядок-два більш швидкодіючими, ніж процедури відповідних алгоритмів багатовимірної оптимізації ОЗММ. Для тонких оболонок фундаментальна матриця розв'язків визначається складними громіздкими виразами, а для пологої сферичної оболонки виражається спеціальними функціями. Тонкі пластини та оболонки використовуються в різних галузях сучасної техніки значно ширше, ніж суцільні тіла, тому розв'язування задач щодо намагнічування тонкостінних конструкцій має особливе значення та представляє собою специфічний граничний випадок загальної магнітостатичної задачі, що заслуговує самостійного розгляду

[7, 16]. У зв'язку з цим авторами був розроблений модифікований метод граничних елементів (ММГЕ) для розв'язування лінійних та нелінійних задач теорії тонких оболонок, що базується на застосуванні фундаментальних рішень, які визначаються простими аналітичними виразами. Розроблений метод об'єднав переваги МГЕ та МВД і позбавлений недоліків цих методів. Основною перевагою ММГЕ є можливість дискретизації розрахункової області, яка має довільну форму і розміри. Цей метод дає змогу скоротити розмірність дискретних моделей поля при чисельній реалізації методу, а також підвищити точність розрахунку [13].

Мета даної статті. Розробка методології реалізації ММГЕ та створення програмного комплексу МВЕМ на базі ММГЕ для розрахунку і моделювання індукованих магнітних полів тонкостінних конструкцій (ІМПТК).

Під методологією реалізації ММГЕ та створенням МВЕМ вважають сукупність способів і засобів реалізації поставленої мети, які представлені у вигляді послідовності етапів їхнього застосування. Цю методологію стисло наведено у таблиці.

Розробка методології реалізації ММГЕ та створення МВЕМ для розрахунку і моделювання ІМПТК	
Початковий етап	Постановка задачі. Розробка аналітичних виразів для розв'язування граничної задачі з використанням ММГЕ та перетворення його в інтегро-диференційне рівняння. Розробка схеми дискретизації отриманого рівняння шляхом апроксимації ППШ у вузлах розрахункової сітки. Розробка СЛАР відносно значень ППШ у цих вузлах.
Етап розрахунку	Візуалізація об'єкта та побудова поверхневої розрахункової сітки. Розв'язок СЛАР та знаходження ППШ у вузлах цієї сітки.
Етап моделювання ІМПТК	Обробка результатів рішення СЛАР та моделювання ІМПТК на екрані. Порівняння отриманих результатів з аналітичними розрахунками та розрахунками, отриманими за допомогою програмного комплексу ANSYS.

Постановка задачі. У стаціонарному випадку (вплив постійного зовнішнього поля \bar{H}_0) потенціал φ_m шуканого поля намагнічування $H_m = -grad \varphi_m$ тонкостінних конструкцій задовольняє [6] рівнянню Лапласа

$$\varphi_m = 0 \quad (1)$$

та наближеним («некласичним») граничним умовам на серединній поверхні конструкції S

$$\left. \begin{aligned} \varphi_m^- - \varphi_m^+ &= 0, \\ \frac{\partial \varphi_m^-}{\partial n} - \frac{\partial \varphi_m^+}{\partial n} + div_s \mu_s^* grad \varphi_m &= div_s \mu_s^* \bar{H}_{0s}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $\mu_s^* = \mu\delta$, $\mu^* = \mu/\mu_0$ та δ – відносна магнітна проникність і товщина конструкції відповідно.

Зовнішнє поле \bar{H}_0 вважається заданим. Потрібно знайти потенціал φ_m та значення напруженості \bar{H}_m індукованого магнітного поля тонкостінних конструкцій S .

Відомо [15], що розрахунок магнітного поля в кусково-однорідному середовищі зводиться до розрахунку поля в однорідному середовищі. Це досягається введенням потенціалу простого шару (ППШ) з густиною g . Розв'язок крайової задачі (1)–(2) перетворюється в інтегро-диференційне рівняння відносно невідомих функцій поля

$$-g(t) + div_s \mu_s^* grad_s \int_S g(q) \Psi_m(t, q) dS_q = div_s \mu_s^* grad_s \bar{H}_{0s}, \quad (3)$$

де t – точка спостереження; q – поточна точка поверхні S ; $\Psi_m(t, q)$ – фундаментальний розв'язок Лапласа.

У запропонованому методі апроксимується не сама функція, а простий шар, що її визначає, тобто формально використовується розкладання по неортогональних функціях [1]. Це має просту фізичну інтерпретацію: ППШ замінюється системою точкових джерел з інтенсивністю $Q_j = \int_{S_j} g(t) dS_t$,

розташованих у вузлах q_j ($j = 1, \dots, N$). Оскільки потенціал $\varphi_m(t)$ є безперервно-диференційованою гладкою функцією на кордонах усіх ділянок, консервативність схеми при зазначеному способі апроксимації (4) не порушується

$$\varphi_m(t) = \sum_{i=1}^N Q_i \Psi_m(t, q_i). \quad (4)$$

Виконаємо дискретизацію рівняння (3) шляхом інтегрування по ділянці поверхні ΔS_j ($j = 1, \dots, N$). При цьому, переходячи від поверхневих інтегралів до контурних, маємо

$$-\int_S g(t) dS_t + \int_{L_j} \mu_s^*(l) \left[\frac{\partial}{\partial n_l} \int g(q) \Psi_m(t, q) dS_q \right] dl = \int_{L_j} \mu_s^*(l) H_{0n}(l) dl, \quad (5)$$

де n_l – зовнішня нормаль до контуру L_j , що обмежує поверхню ΔS_j .

Рівняння (5) представляє собою умову балансу магнітного потоку для контрольного об'єму (елемента тонкостінної конструкції), обмеженого циліндричною поверхнею з твірною L_j .

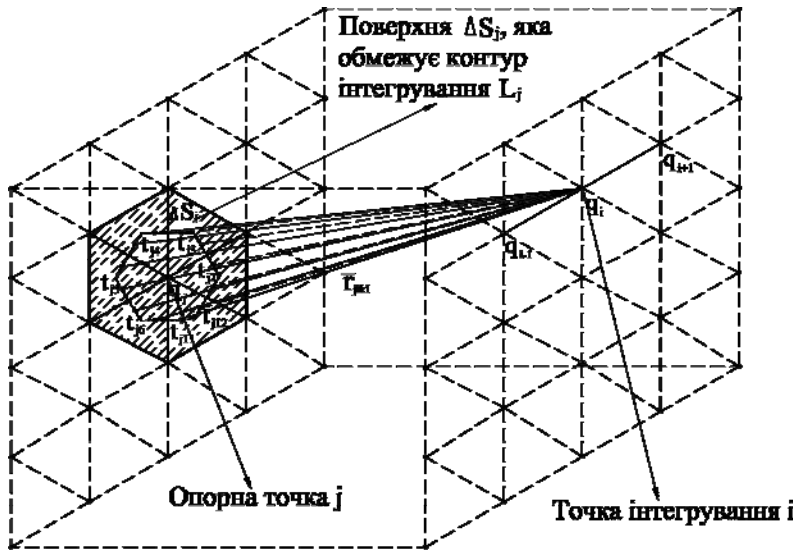


Рис. 1

Співвідношення балансу має універсальний характер, тому що використана схема дискретизації дає змогу отримати фізично правдоподібне розв'язання навіть у тих випадках, коли ПППШ має особливості всередині ΔS_j (у точках розриву μ_s^* , злому, стику або перетину поверхонь). Особливу точку доцільно розмішувати в центрі q_j ділянки ΔS_j (рис. 1). Надалі центри ділянки називатимемо вузлами. Апроксимація тривимірної поверхні для розрахунку ПППШ показана на рис. 1.

У результаті рівняння (3) зводиться до такої системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) відносно значень Q_j :

$$-Q_j + \int_{L_j} \mu_s^*(l) \left[\frac{\partial}{\partial n_l} \sum_{i=1}^N Q_i \Psi_m(t, q_i) \right] dl = \int_{L_j} \mu_s^*(l) H_{0n}(l) dl, \quad j = 1, \dots, N. \quad (6)$$

При цьому ядро рівняння (6) розраховується за формулою

$$\nabla_{S_j}^2 \frac{1}{r_{iq_i}} = \nabla_{S_j} \left(\nabla_{S_j} \frac{1}{r_{iq_i}} \right) \approx \frac{1}{\Delta S_{q_i}} \oint_{L_j} (n_l, \nabla_{S_j} \frac{1}{r_{iq_i}}) dl_j = \frac{1}{\Delta S_{q_i}} \oint_{L_j} \frac{\partial}{\partial n_l} \frac{1}{r_{iq_i}} dl_j. \quad (7)$$

Це дає можливість записати рівняння (6) у компактному вигляді та змінити порядок додавання й інтегрування

$$-Q_j + \sum_{i=1}^N a_{ij} Q_i = c_j, \quad j = 1, \dots, N, \quad (8)$$

$$\text{де } a_{ij} = \int_{L_j} \frac{\mu_s^*(l)}{\Delta S_{q_j}} \frac{\partial \Psi_m(t, q_i)}{\partial n_l} dl; \quad c_j = \int_{L_j} \frac{\mu_s^*(l)}{\Delta S_{q_j}} H_{0n}(l) dl. \quad (9)$$

Інтеграли у згаданому вище рівнянні зв'язують вузол q_j , для якого застосовується фундаментальний розв'язок, з вузлом q_i ($i = 1, \dots, N$), a_{ij} та c_j виражають внесок вузлових значень у формування Q_j , тому їх часто називають коефіцієнтами впливу [19]. Точка q_j залишається незмінною (опорна точка), в той час як точка q_i змінюється по i -му елементу (точка інтегрування).

СЛАР (8) може бути представлена в матричному вигляді

$$[A]\{Q\} = \{C\}, \quad (10)$$

де $[A]$ – матриця коефіцієнтів впливу, що виражає внесок вузлових значень q_i у формування значень q_j ; $\{Q\}$ – шуканий вектор вузлових значень q_j ; $\{C\}$ – вектор, що виражає внесок у формування значень q_j зовнішнього поля \bar{H}_0 .

Після розв'язання СЛАР шуканий потенціал ϕ_m розраховується за формулою (4), а напруженість поля визначається з наступного співвідношення:

$$\bar{H}_m(t) = -\sum_{i=1}^N Q_i \text{grad}_t \Psi_m(t, q_i). \quad (11)$$

Для візуалізації об'єкта та побудови поверхневої розрахункової сітки (рис. 1) у розробленому програмному комплексі МВЕМ були використані програмні пакети Gmsh [17] та Ani3D [5]. Програмний код цих пакетів розповсюджується вільно. Вони надійні, прості у використанні. В Gmsh та Ani3D входять бібліотеки для: побудови та адаптації неструктурованих сіток; дискретизації та інтерполяції вузлів побудованої сітки; підготовки результатів побудови сіток до розв'язування систем лінійних та нелінійних алгебраїчних рівнянь. На відміну від Ani3D, Gmsh може візуалізувати результати розрахунку. МВЕМ приймає вхідні параметри, які задає користувач. Сам користувач вибирає, за допомогою яких сіткових генераторів Gmsh чи Ani3D виконати побудову поверхневої сітки та куди вивести результати розрахунку: візуалізувати результати програми за допомогою інтерфейсу Gmsh чи вивести їх у файл. Спочатку користувач задає параметри об'єкта, значення магнітної проникності матеріалу та вектора зовнішньої напруженості (H_{0x}, H_{0y}, H_{0z}). МВЕМ дає змогу створити довільний об'єкт в інтерактивному режимі чи завантажити вже існуючий об'єкт. Після побудови геометрії об'єкта програмний комплекс генерує сітку та виводить результат на екран. Якщо результат триангуляції не влаштовує, то розроблений програмний комплекс дає змогу змінити параметри триангуляції (алгоритм розбиття мережі, крок розбиття, параметри згладжування, застосувати Lloyd алгоритм та інше), після натискання кнопки «RUN» відбувається розрахунок ППШ та індукованого магнітного поля. Після того, як була побудована сітка, розраховується потенціал простого шару (ППШ) та виводиться результат розрахунку індукованого магнітного потенціалу та напруженості у вигляді графіків та векторів. Крім того, за розрахованим значенням потенціалу простого шару можна з легкістю знайти індуковане поле в будь-якій точці простору. Користувач може обирати значення векторів напруженості, які будуть виводитися на екран: вектор індукованої напруженості \bar{H}_m чи вектор результуючої напруженості $\bar{H} = \bar{H}_0 + \bar{H}_m$.

Розроблений програмний комплекс МВЕМ є першим кроком на шляху до створення нової інформаційної технології інтерпретації затонулих об'єктів по магнітних полях. Із застосуванням розробленого програмного комплексу планується дослідити закономірності зв'язку полів та їхніх джерел; створити інформаційну базу (ІБ) індукованих магнітних полів тонкостінних конструкцій різної форми; створити обчислювальні алгоритми і програми для інтерпретації затонулих об'єктів на основі ІБ магнітних полів тонкостінних конструкцій та штучних нейронних мереж.

Робота програмного комплексу МВЕМ була розглянута на прикладі тонкостінного циліндру (зовнішній радіус циліндру $r_1 = 1.55$ м, внутрішній радіус $r_2 = 1.45$ м, довжина $l = 30$ м, товщина $\delta = 0.1$ м), який знаходиться в рівномірному магнітному полі $H_{0z} = -1$ А/м. Центр труби співпадає з початком координат. Виконано порівняння одержаних результатів з аналітичними розрахунками та розрахунками, отриманими з використанням програмного комплексу ANSYS.

Було знайдено скалярний потенціал всередині оболонки ϕ_m^+ , зовні оболонки ϕ_m^- , та потенціал матеріалу оболонки ϕ при $\vartheta = 0$ ($-5 \leq x \leq 5, y = 0, z = 0$) аналітично за формулою (12) Краснова І.П. [7], та чисельно із застосуванням програмного комплексу МВЕМ, заснованого на ММГЕ

$$\left. \begin{aligned} \phi_m^+(r, \vartheta) &= H_1^0 \frac{R_1^2 - R_2^2}{((k+2)R_1^2/k - kR_2^2/(k+2))} \frac{k}{k+2} r \cos \vartheta; \\ \phi(r, \vartheta) &= H_1^0 \left(\frac{R_1^2 - kR_2^2/(k+2)}{((k+2)R_1^2/k - kR_2^2/(k+2))} r \cos \vartheta - \frac{2R_1^2 R_2^2/(k+2)}{((k+2)R_1^2/k - kR_2^2/(k+2))} \frac{\cos \vartheta}{r} \right); \\ \phi_m^-(r, \vartheta) &= H_1^0 \frac{(R_1^2 - R_2^2) \cdot R_1^2}{((k+2)R_1^2/k - kR_2^2/(k+2))} \frac{\cos \vartheta}{r}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де R_1 та R_2 – зовнішні та внутрішні радіуси оболонки відповідно, r – відстань від точки спостереження до оболонки, k – магнітна сприйнятливості матеріалу, ϑ – кут між точками розрахунку та спостереження.

На рис. 2 показано залежність скалярного потенціалу φ_m від відстані r , яка розрахована за допомогою ММГЕ в програмному комплексі МВЕМ (рис. 2, а) та аналітично по формулі (12) (рис. 2, б). З рисунка видно, що значення φ_m , розрахованого чисельно і аналітично, співпали.

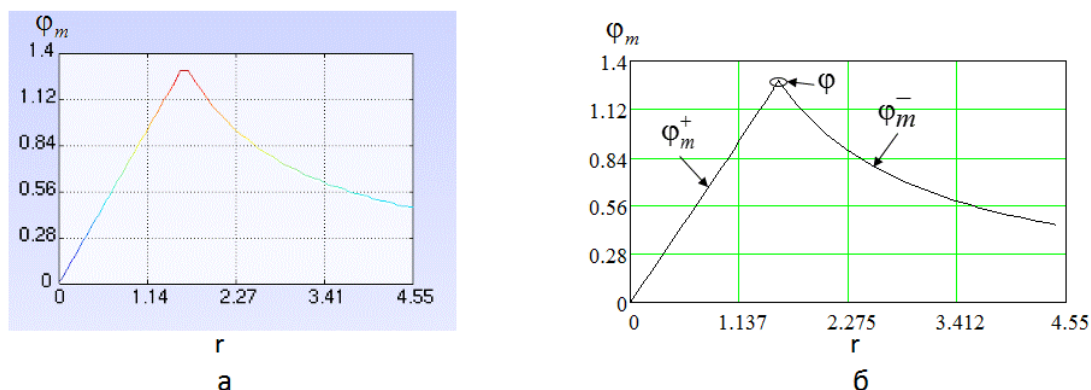


Рис. 2

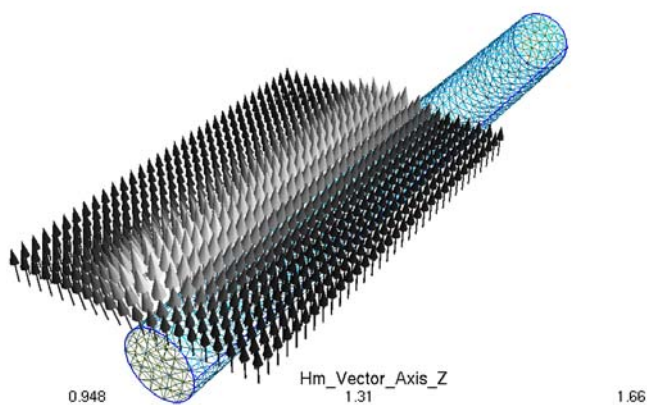


Рис. 3

Було знайдено розподіл результуючого вектора напруженості \vec{H} на площині, яка знаходиться на відстані 0.7 м нижче тонкостінного циліндра та має координати $-5 \leq x \leq 5$, $-16 \leq y \leq 0$, $z = -2.2$. Розподіл вектора напруженості на цій площині був розрахований з використанням модифікованого методу граничних елементів у програмному комплексі МВЕМ ($0.948 \leq \bar{H}_m \leq 1.66$, рис. 3) та МСЕ в програмному комплексі ANSYS ($0.951 \leq \bar{H}_m \leq 1.69$, рис. 4). Результати розрахунків, отриманих із застосуванням ММГЕ і МСЕ, співпали.

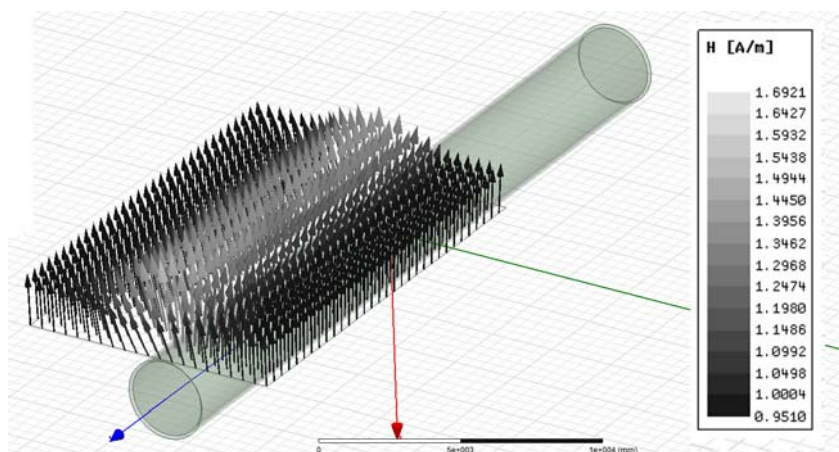


Рис. 4

Висновки. Запропоновано методологію реалізації ММГЕ та створення програмного комплексу МВЕМ на базі ММГЕ для розрахунку і моделювання ІМПТК.

На базі ММГЕ розроблено програмний комплекс МВЕМ із дружнім інтерфейсом, який реалізовано на операційній системі Linux з використанням gmsh та ani3d генераторів з застосуванням C та C++ мов програмування та працює в багатонитковому режимі. Цей програмний комплекс має безкоштовну ліцензію використання та відкриті вихідні коди, тобто програмний код МВЕМ доступний для перегляду, вивчення та зміни.

Виконане порівняння з аналітичними рішеннями показало, що значення магнітного потенціалу, отримані з використанням розробленого методу, були підтверджені аналітичними розрахунками (рис. 2, а та рис. 2, б). Виконано порівняння результатів розрахунку поля вектора напруженості, які були отримані завдяки розробленому методу, з результатами розрахунку найпопулярнішим чисельним методом МСЕ. Отримані значення поля вектора результуючої напруженості на площині, що знаходиться під об'єктом (рис. 3 та рис. 4), із застосуванням ММГЕ та МСЕ, співпали.

Використовуючи ММГЕ, планується створити інформаційну базу (ІБ) індукованих магнітних полів тонкостінних конструкцій у тривимірному просторі для ідентифікації підводних об'єктів. Отримані залежності вектора магнітної напруженості тонкостінних конструкцій від відстані увійдуть до бібліотеки розпізнавання образів об'єктів за їхніми магнітними полями. Популярні програмні продукти розрахунку магнітного поля використовують тільки метод скінченних елементів, оминаючи питання застосування інших методів, які більш ефективні для моделювання ІМПТК [10]. Розроблена САП пропонується у вільному доступі, що робить її доступною для широкого кола проектувальників.

1. Алексидзе М.А. Решение граничных задач методом разложения по неортогональным функциям. Москва: Наука, 1978. 352 с.
2. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. 2009. 235 с. URL: <http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-interp.pdf> (дата звернення 25.02.2018)
3. Булычев А.А., Лыгин И.В., Мелихов И.В. Численные методы решения прямых задач грави- и магнито-разведки. Москва: Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010. 164 с.
4. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Обзор геофизических методов исследований при решении инженерно-геологических и инженерных задач. Москва: ГСД Продакшен, 1998. 67 с.
5. Данилов А.А. Способы построения трёхмерных поверхностных триангуляций и тетраэдральных сеток. *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2010. Т. 65. № 1. С. 87–92.
6. Краснов И.П. О решение некоторых граничных задач теории гармонических функций. *Дифференциальные уравнения*. 1975. Т. XI. № 11. С. 2052-2066.
7. Краснов И.П. Расчетные методы судового магнетизма и электротехники. Ленинград: Судостроение, 1986. 216 с.
8. Крапивский Е.И., Некучаев В.О. Дистанционная магнитометрия газонефтепроводов. Ухта: Изд. УГТУ, 2011. 142 с.
9. Корниенко Ю.В. Математическое моделирование и анализ плоскостранных конструктивных элементов в САПР: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.12 / Одеський національний політехнічний університет. Одесса. 2015. 170 с.
10. Морозов В.А. Банк моделей и методов для расчета электростатических полей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.05 / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Новочеркасск, 2003. 137 с.
11. Пашковский А.И. Численно-аналитические методы стандартных элементов для моделирования стационарных физических полей в линейных кусочно-однородных и нелинейных средах: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.13.18 / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Новочеркасск, 2014. 36 с.
12. Резинкина М.М., Лобжанидзе Л.Э. Исследование магнитного поля трехмерных ферромагнитных объектов. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 1. С. 19-23.
13. Рябенский В.М., Чудайкин І.І., Таргунакова Ю.Д. Модифікований метод граничних елементів та алгоритм розв'язання задач обчислення індукованого магнітного поля тонкостінних конструкцій у тривимірному просторі. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання*. 2017. № 1 (021). С. 403–409.
14. Стариков В.С. Инженерная магнитометрия при исследовании технического состояния стальных трубопроводов большого диаметра. *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. 2016. № 3. С. 114–118.
15. Тозони О.В., Маергойз И.Д. Метод вторичных источников в электротехнике. Москва: Энергия, 1975. 296 с.
16. Хайруллин Ф.С. Расчет тонкостенных конструкций сложной формы на основе аппроксимирующих функций с конечными носителями. Казань: Издательство КНИТУ, 2012. 176 с.
17. Geuzaine C., Remacle J. User manual Gmsh. 2017. URL: <http://gmsh.info/doc/texinfo/gmsh.html> (дата звернення 25.02.2018)
18. Holmes J.J. Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures. Arizona: Morgan & Claypool Publishers, 2008. 68 с.
19. Katsikadelis John T. The Boundary Element Method for Engineers and Scientists. Academic Press, 2016. 464 p.

УДК 621.317.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУЦИРОВАННЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.М. Рябенский, докт. техн. наук, **И.И. Чудайкин**, канд. техн. наук, **Ю.Д. Таргунакова**

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,

пр. Центральный, 3, Николаев, 54021, Украина,

e-mail: golubkajulya@gmail.com

Предложено методологию реализации модифицированного метода граничных элементов (ММГЕ) и создание программного комплекса МВЕМ на базе разработанного метода для расчета и моделирования индуцированных магнитных полей тонкостенных конструкций в трехмерном пространстве. В статье приводятся значения вектора результирующей магнитной напряженности тонкостенного цилиндра, которые рассчитаны на основании ММГЕ и были подтверждены результа-

тами, полученными с использованием программного комплекса ANSYS. Значения магнитного потенциала, полученные с помощью разработанного метода, были подтверждены аналитическими расчётами. Библ. 19, рис. 4, табл. 1.

Ключевые слова: расчет скалярного магнитного потенциала и вектора напряженности индуцированного магнитного поля тонкостенных конструкций; модифицированный метод граничных элементов (ММГЕ); методология реализации ММГЕ и программного комплекса MBEM.

INVESTIGATION OF THE THIN STRUCTURES INDUCED MAGNETOSTATIC FIELDS IN A THREE-DIMENSIONAL SPACE BY MEANS OF THE OF THE MODIFIED BOUNDARY ELEMENTS METHOD DEVELOPMENT

V.M. Ryabenskiy, I.I. Chudaykin, J.D. Targunakova

Admiral Makarov National University of the Shipbuilding,

pr. Tsentralnyi, 3, Mykolaiv, 54021, Ukraine, e-mail: golubkajulya@gmail.com

The methodology of the modified boundary elements method implementation and developing of the MBEM software package based on the mentioned method (which can be used for calculating and simulating induced magnetic fields of thin-walled structures in three-dimensional space) were proposed. Calculations of the magnetic field of a thin-walled cylindrical shell is performed using the developed method. The results of the calculations obtained with the help of the modified boundary elements method - values of the resultant magnetic tension vector of a thin-walled cylinder, calculated by the MBEM software package are presented. The results were confirmed by the results obtained with the finite element method using ANSYS software; and the values of the magnetic potential calculated using the developed method were confirmed by analytical calculations. References 19, figures 4, table 1.

Keywords: calculations of the scalar magnetic potential and H-field vector of the thin-walled object induced magnetic field; modified Boundary Elements Method; methodology of implementation of the modified boundary element method and developing of the MBEM software package.

1. Aleksidze M.A. Solution of Boundary Value Problems by the Method of Expansion in Non-orthogonal Functions. Moskva: Nauka, 1978. 352 p. (Rus)
2. Bloh Yu.I. Interpretation of gravitational and magnetic anomalies. URL: <http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-interp.pdf> (Accessed 25.02.2018) (Rus)
3. Bulyichev A.A., Lygin I.V., Melikhov I.V. Numerical methods for solving direct problems of gravimetric and magnetometric analyses. Moskva: Lomonosov Moscow State University, 2010. 164 p. (Rus)
4. Vladov M.L., Starovoytov A.V. Review of geophysical methods of research in solving engineering-geological and engineering problems. Moskva: GDD Production, 1998. 67 p. (Rus)
5. Danilov A.A. Tetrahedral and surface triangular mesh generation techniques. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics ITMO University*. 2010. 1(65). Pp. 87-89. (Rus)
6. Krasnov I.P. On the solution of certain boundary value problems of the theory of harmonic functions. *Differential Equations*. 1975. Vol. XI. No 11. Pp. 2052-2066. (Rus)
7. Krasnov I.P. Calculated methods of ship magnetism and electrical engineering. Leningrad: Sudostroenie, 1986. 216 p. (Rus)
8. Kravivsky E.I., Nekuchaev V.O. Remote magnetometry of gas and oil pipelines. Ukhta: USTU, 2011. 142 p. (Rus)
9. Kornienko Yu.V. Mathematical modeling and analysis of the plane-spatial structural elements in CAD: Extended abstract of Dr. tech. sci. diss.: 05.13.12 / Odessa National Polytechnic University. Odessa. 2015. 170 p. (Rus)
10. Morozov V.A. Bank of models and methods for calculating electrostatic fields: thesis of kand. tech. sci. diss.: 05.09.05 / South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov. Novocherkassk, 2003. 137 p. (Rus)
11. Pashkovskiy A.I. Numerically analytical methods of standard elements for modeling stationary physical fields in linear piecewise-homogeneous and nonlinear media: Extended abstract of Dr. tech. sci. diss.: 05.13.18 / South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov. Novocherkassk, 2014. 36 p. (Rus)
12. Rezinkina M.M., Lobzhanidze L.E. Analysis of magnetic field of three-dimensional ferrous objects: *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2011. No 1. Pp. 19-23. (Rus)
13. Ryabenskiy V.M., Chudaykin I.I., Targunakova J.D. Modified Boundary Elements Method and algorithm for solving problems of the thin structures induced fields in a three dimensional space. *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterne modeliuvannia*. 2017. No 1 (021). Pp. 192-199. (Ukr)
14. Starikov V.S. Engineering magnetometry in the stude of technical state of large diameter steel pipelines. *Vestnik VGU. Seriya: Geologiya*. No 3. 2016. Pp. 114-118. (Rus)
15. Tozoni O.V. The method of secondary sources in electrical engineering. Moskva: Energiia, 1975. 296 p. (Rus)
16. Hayrullin F.S. Calculation of thin-walled structures of complex shape on the basis of approximating functions with finite carriers. Kazan: KNITU, 2012. 176 p. (Rus)
17. Geuzaine C., Remacle J. User manual Gmsh. 2017. URL: <http://gmsh.info/doc/texinfo/gmsh.html>. (Accessed 06.10.2017).
18. Holmes J.J. Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures. Arizona: Morgan & Claypool Publishers, 2008. 68 p.
19. Katsikadelis John T. The Boundary Element Method for Engineers and Scientists. Academic Press, 2016. 464 p.

Надійшла 13.10.2017
Остаточний варіант 03.05.18